PERFORMANCE DE CINQ ANS EN PLANTATIONS COMPARATIVES DE PLANTS RÉSINEUX DE FORTES DIMENSIONS ET DE FEUILLUS CULTIVÉS DANS DES RÉCIPIENTS À PAROIS AJOURÉES

2002

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N°141

Par

Benoit-Marie Gingras,

Serge Richard,

Nicole Robert.

Québec

102-04919/

Performance de cinq ans en plantations comparatives de plants résineux de fortes dimensions et de feuillus cultivés dans des récipients à parois ajourées

2002

Mémoire de recherche forestière n°141

Par

Benoit-Marie Gingras, ing.f., M.Sc.

Serge Richard, techn.for.

Nicole Robert, techn.for.

Gouvernement du Québec

Ministère des Ressources naturelles

Direction de la recherche forestière

Avant-propos

Ce mémoire de recherche forestière présente les résultats de cinq ans en plantations de la survie, de la croissance et de l'analyse du développement du système racinaire de plants de fortes dimensions (PFD) d'Épinette noire et d'Épinette blanche, ainsi que de Bouleau jaune et de Chêne rouge cultivés dans des récipients à parois ajourées. Ce document vient compléter le mémoire n° 130 (GINGRAS et RICHARD 1999) qui expose entre autres, pour les mêmes dispositifs expérimentaux, le bilan pour les deux ou trois premières années en plantations. Les résultats de la croissance en hauteur et en diamètre, déjà présentés dans le mémoire n° 130, sont inclus dans ce document de manière à avoir un portrait complet du comportement des plants durant les cinq premières années. Toutefois, l'analyse et l'interprétation de ces résultats ne sont pas reprises. Le lecteur intéressé à connaître l'historique de la culture en pépinières de l'ensemble des semis utilisés pour nos plantations expérimentales doit se référer au mémoire de recherche n° 130.

Notes biographiques

Mission de la DRF

La Direction de la recherche forestière (DRF) contribue au développement durable du secteur forestier en répondant aux préoccupations et aux besoins de ses clients en matière d'aménagement du milieu forestier. Elle réalise des travaux de recherche appliquée et de développement. Ces résultats de recherche sont transférés aux utilisateurs sous forme de nouvelles connaissances, de pratiques inédites et d'outils novateurs.

Les Mémoires de recherche forestière de la DRF

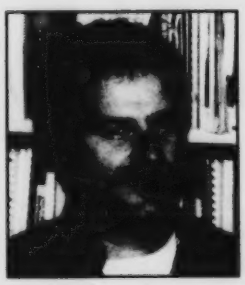
Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité ad hoc formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou expérience. Ce document gratuit est tiré à 1 000 exemplaires. Il est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

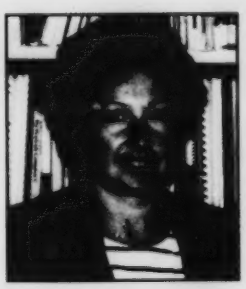
Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière, Forêt Québec
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 3W8
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca
Internet : www.mrn.gouv.qc.ca/drf

Benoit-Marie Gingras est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1986. En 1992, ce même établissement lui décernait le titre de maître ès sciences (sciences forestières). À l'emploi du Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie de la Direction de la recherche forestière depuis 1987, il est chargé de recherches sur la production de plants en pépinières forestières et sur l'évaluation de la performance des plants en plantations comparatives. Il a également été responsable intérimaire de l'équipe de recherche en production de plants.

Serge Richard détient, depuis 1986, un baccalauréat en sciences forestières de l'Université Laval. Entré au Ministère en 1988, il est présentement affecté au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie de la Direction de la recherche forestière (production de plants). Actuellement, il collabore à la réalisation de l'ensemble des dispositifs de recherche établis en pépinières puis à l'établissement de plantations comparatives.



Nicole Robert est technicienne en foresterie diplômée du cégep de Sainte-Foy depuis 1981. De 1984 à 1992, elle occupe le poste de technicienne en protection des forêts au Ministère. Depuis 1992, elle est affectée au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie de la Direction de la recherche forestière (production de plants) où elle collabore à la réalisation de l'ensemble des dispositifs de recherche établis en pépinières puis à l'établissement de plantations comparatives.



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le personnel des pépinières forestières de Saint-Modeste et de Berthierville ainsi que la Direction de la production des semences et des plants (DPSP) pour leur collaboration et leur support à la production des semis en pépinières. Nous adressons aussi des remerciements à Louis Labrecque de la région 01, à Daniel Saint-Hilaire de la Société Sylvicole Arthabaska-Drummond inc., à Jean Ménétrier, Daniel Plourde et Denis Hotte du Service de la sylviculture et du rendement des forêts de la Direction de la recherche forestière (DRF), au personnel du laboratoire de chimie organique et inorganique de la DRF, à Isabelle Auger, Josianne DeBlois et France Savard de l'équipe de biométrie du Service des expertises scientifiques, de liaison et de coordination de la DRF ainsi qu'à Linda Veilleux et Michel Houle du Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie de la DRF pour leur participation à la réalisation de différentes étapes du projet de recherche. Nous remercions également Hank Margolis du Centre de recherche en biologie végétale de l'Université Laval, Mohammed Lamhamedi et Mario Renaud de la DRF et Daniel Robert de la DPSP pour la révision du document ainsi que Pierre Bélanger et Jean-Bernard Fortin de la DRF pour l'édition de ce mémoire.

Résumé

L'utilisation de récipients à parois pleines en pépinières forestières induit des malformations aux systèmes racinaires qui peuvent affecter la résistance aux maladies, la qualité du bois, la stabilité, la croissance et la survie des arbres en plantations. La mise en terre de plants produits dans des récipients à parois ajourées devrait permettre de diminuer les effets défavorables de la culture dans les récipients à parois pleines sur l'architecture des racines, et ainsi augmenter la performance des plants en plantations. Afin de valider cette hypothèse, des plants de fortes dimensions (PFD) d'Épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.) et d'Épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss), ainsi que de Bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et de Chêne rouge (*Quercus rubra* L.) ont été produits en pépinières dans des récipients à parois ajourées (*1-360A, 25-350A, 1-350A et 1-1050A*) et des récipients à parois pleines (*15-320, 45-340, 28-340 et 12-1000*). Ces plants ont été mis en terre dans sept sites expérimentaux. Les quatre sites pour les PFD sont situés dans la réserve faunique de Rimouski (1993 [N 47° 57' 30,3", W 68° 24' 23,7"] et 1994 [N 47° 57' 41,9", W 68° 24' 35,4"]) tandis que les trois sites pour les feuillus sont situés à Saint-Germain-de-Grantham (1994 [N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05"]). Une préparation de terrain a été effectuée dans chacun des sites.

Bien que quelques différences significatives aient été observées dans nos plantations de cinq ans, les résultats n'ont pas permis de démontrer, à l'exception du Chêne rouge, des avantages à cultiver les semis dans des récipients à parois ajourées. La survie, la croissance et le développement racinaire sont dans l'ensemble semblables entre les récipients à parois ajourées et les récipients à parois pleines. Pour les conifères, l'utilisation de récipients à parois ajourées a permis de diminuer significativement le problème d'enroulement des racines dans le haut de la carotte. Cette différence est toutefois imputable uniquement à la forme carrée de la cavité. La culture de semis dans la cavité *1-350A* n'a pas permis d'améliorer l'architecture des racines ou la performance des plants par rapport au récipient *25-350A*. On a même observé une production inférieure de nouvelles racines (>1,0 cm) dans la cavité *1-350A* en comparaison avec le récipient *25-350A*. Ce récipient est actuellement utilisé pour la production à grande échelle des PFD. Pour les feuillus, les semis de Bouleau jaune cultivés dans la cavité *1-350A* présentent un taux de survie significativement inférieur à celui des semis produits dans le récipient *45-340*.

Les semis d'Épinette noire, d'Épinette blanche et de Bouleau jaune ont démontré une grande aptitude à développer des racines adventives. Certains plants de Chêne rouge ont également produit quelques racines adventives. Ces racines, formées au-dessus du système racinaire d'origine, deviendront rapidement une composante importante du système racinaire. En conséquence, au moment de la plantation, les semis devraient être mis en terre à une profondeur suffisante pour favoriser la formation de racines adventives. Compte tenu de nos observations de cinq ans sur l'architecture des systèmes racinaires, il nous semble actuellement très peu probable que des problèmes de stabilité ou de défauts de forme à la base de la tige soient observés dans l'avenir. Même s'il ne présente pas les avantages escomptés à la cinquième année en plantation, le récipient *25-350A* demeure approprié pour la production de PFD.

Mots-clés : *Betula alleghaniensis*, croissance, développement racinaire, *Picea glauca*, *Picea mariana*, plantation, plants de fortes dimensions, *Quercus rubra*, récipients à parois ajourées, récipients à parois pleines, survie.

Abstract

For the production of container-grown forest tree seedlings in nurseries, the use of conventional containers (with solid-walls) induces seedling root deformations which can affect disease resistance, wood quality, stability, growth and survival of trees in plantations. On the other hand, the air-slit containers could be used in nursery to decrease the unfavourable effects of conventional containers on root architecture and also to increase the performance of containerized seedlings in plantations. In order to validate this hypothesis, large size seedling (LSS) of black spruce (Picea mariana [Mill.] B.S.P.), white spruce (Picea glauca [Moench] Voss) and of yellow birch (Betula alleghaniensis Britton) and red oak (Quercus rubra L.) were produced in nursery in both air-slit containers (1-360A, 25-350A, 1-350A and 1-1050A) and conventional containers (15-320, 45-340, 28-340 and 12-1000). Seedlings of these four species were planted in seven experimental sites. For coniferous LSS, four sites are located in the Réserve faunique de Rimouski (1993 [N 47° 57' 30.3", W 68° 24' 23.7"] and 1994 [N 47° 57' 41.9", W 68° 24' 35.4"]) while for hardwood species, three sites are located in Saint-Germain-de-Grantham (1994 [N 45° 52' 33.1", W 72° 35' 05"]). Site preparation was carried out in each experimental plantation.

Although some significant differences were observed five years after planting, our results did not show any advantages to use air-slit containers for the production of container-grown seedlings in nurseries, except for red oak. Survival, growth and root development were generally similar between air-slit and conventional containers. For the two conifer species, the use of air-slit containers decreased significantly the problem of roots developed in spiral at the top of the plug but this difference can be explained by the square shape of the cavity. Compared to the 25-350A container, the 1-350A container did not improve the architecture of root systems as well as the performance of seedlings in plantation. Also, we observed a lower production of new roots (>1,0 cm) in the 1-350A container than for the 25-350A container. This 25-350A container is currently used on an operational basis in forest tree nurseries for LSS productions. For hardwood species, yellow birch seedlings produced in the 1-350A container had a significantly lower survival rate than those produced in the 45-340 container.

Seedlings of black spruce, white spruce and yellow birch showed a great ability to develop adventitious roots whereas red oak seedlings produced adventitious roots to a less degree. These roots, which are developed above the original root system, will quickly become a significant component of root systems. Consequently, seedlings should be planted at a sufficient depth in order to allow the formation of adventitious roots. Considering our observations on the architecture of root systems five years after planting, we believe that, it is acually unlikely to observe in the future problems of stability or form flaws at the base of the stem. Although air-slit container did not show the expected advantages in plantation after five years, the 25-350A container remains appropriate for LSS production.

Key-words : air-slit container, Betula alleghaniensis, *conventional container, growth,* Quercus rubra, *large size seedling,* Picea mariana, Picea glauca, *plantation, root development, survival.*

Table des matières

Avant-propos iii

Notes biographiques iv

Remerciements v

Résumé vii

Abstract ix

Liste des tableaux xvii

Liste des figures xix

Introduction 1

Chapitre premier Notions de développement racinaire 5

1.1 Rôles et fonctions des racines 5

1.2 Système racinaire des conifères 5

1.2.1 Plants naturellement établis 5

1.2.2 Plants mis en terre 6

1.2.3 Racines adventives 7

1.3 Système racinaire des feuillus 8

1.3.1 Plants naturellement établis 8

1.3.2 Plants mis en terre 9

1.4 Conséquences des malformations racinaires 9

1.5 Caractéristiques des sites de reboisement et facteurs environnementaux 11

1.6 Préparation de terrain et mise en terre des plants 12

Chapitre deux Matériel et méthodes 15

2.1 Biencourt P93.1 Épinette noire 15

2.2 Biencourt P93.1 Épinette blanche 16

2.3 Biencourt P94.1 Épinette blanche 18
2.4 Biencourt P94.2 Épinette blanche 20
2.5 Saint-Germain-de-Grantham P94.3 Bouleau jaune 20
2.6 Saint-Germain-de-Grantham P94.3 Chêne rouge 22
2.7 Saint-Germain-de-Grantham P94.4 Chêne rouge 22

Chapitre trois Résultats des plantations résineuses 23

3.1 Taux de survie et croissance 23
3.1.1 P93.1 Épinette noire 23
3.1.2 P93.1 Épinette blanche 23
3.1.3 P94.1 Épinette blanche 27
3.1.4 P94.2 Épinette blanche 27
3.2 Concentrations en minéraux dans les tissus 27
3.2.1 P93.1 Épinette noire 27
3.2.2 P93.1 Épinette blanche 33
3.2.3 P94.1 Épinette blanche 33
3.2.4 P94.2 Épinette blanche 33
3.3 Développement racinaire 34
3.3.1 P93.1 Épinette noire 34
3.3.2 Plants d'Épinette noire naturellement établis 37
3.3.3 P93.1 Épinette blanche 37
3.3.4 P94.1 Épinette blanche 43
3.3.5 Plants d'Épinette blanche naturellement établis 49

Chapitre quatre Résultats des plantations feuillues 51

4.1 Taux de survie et croissance 51
4.1.1 P94.3 Bouleau jaune 51
4.1.2 P94.3 Chêne rouge 51
4.1.3 P94.4 Chêne rouge 56
4.2 Concentrations en minéraux dans les tissus 56

4.2.1 P94.3 Bouleau jaune 56
4.2.2 P94.3 Chêne rouge 56
4.2.3 P94.4 Chêne rouge 56
4.3 Développement racinaire 56
4.3.1 P94.3 Bouleau jaune 56
4.3.2 Plants de Bouleau jaune naturellement établis 61
4.3.3 P94.3 Chêne rouge 61
4.3.4 P94.4 Chêne rouge 67
4.3.5 Plants de Chêne rouge naturellement établis 67

Chapitre cinq Discussion 77

5.1 Plantations résineuses 77
5.2 Plantations feuillues 80

Conclusion et perspectives d'avenir 83
Références bibliographiques 87
Annexe A. Caractéristiques des récipients utilisés 94
Annexe B. Localisation des sites expérimentaux 95
Annexe C. Caractéristiques des sites de reboisement 96
Annexe D. Schéma des dispositifs expérimentaux P93.1 Épinette noire et P93.1 Épinette blanche 97
Annexe E. Feuille de prise de données pour l'analyse des systèmes racinaires 98
Annexe F. Schéma des dispositifs expérimentaux P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche 99
Annexe G. Schéma des dispositifs expérimentaux P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge 100

Liste des tableaux

Tableau 1. Concentrations en éléments minéraux des plants des dispositifs P93.1 Épinette noire, P93.1 Épinette blanche, P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche à la cinquième année de plantation 33

Tableau 2. Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08) 34

Tableau 3. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis d'Épinette noire régénérés naturellement 39

Tableau 4. Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07) 39

Tableau 5. Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19) 45

Tableau 6. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis d'Épinette blanche régénérés naturellement 49

Tableau 7. Concentrations en éléments minéraux des plants des dispositifs P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge à la cinquième année de plantation 59

Tableau 8. Analyse des systèmes racinaires des semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340, 25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21) 59

Tableau 9. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis de Bouleau jaune régénérés naturellement 65

Tableau 10. Analyse des systèmes racinaires des semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340, 25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14) 65

Tableau 11. Analyse des systèmes racinaires des semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15) 71

Tableau 12. Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis de Chêne rouge régénérés naturellement 71

Liste des figures

Figure 1. Hiérarchisation de l'allocation du carbone dans les arbres 12

Figure 2. Sites expérimentaux P93.1 Épinette noire et P93.1 Épinette blanche au moment de la mise en terre des semis au printemps 1994 17

Figure 3. Sites expérimentaux P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche au moment de la mise en terre des semis au printemps 1995 19

Figure 4. Sites expérimentaux P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge au moment de la mise en terre des semis au printemps 1995 21

Figure 5. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1998) – dispositif P93.1 Épinette noire 24

Figure 6. Plant d'Épinette noire (dispositif P93.1 – récipient *15-320*) à la cinquième année (1998) de plantation 25

Figure 7. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1998) – dispositif P93.1 Épinette blanche 26

Figure 8. Plant d'Épinette blanche (dispositif P93.1 – récipient *1-360A* à 1,0 cm) à la cinquième année (1998) de plantation 28

Figure 9. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) – dispositif P94.1 Épinette blanche 29

Figure 10. Plant d'Épinette blanche (dispositif P94.1) à la cinquième année (1999) de plantation 30

Figure 11. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) – dispositif P94.2 Épinette blanche 31

Figure 12. Plant d'Épinette blanche (dispositif P94.2) à la cinquième année (1999) de plantation 32

Figure 13. Développement racinaire de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08) 35

Figure 14. Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08) 36

Figure 15. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08) 38

Figure 16. Exemples de développement racinaire de plants d'Épinette noire régénérés naturellement (99/07/23) .. 40

Figure 17. Développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07) 41

Figure 18. Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07) 42

Figure 19. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07) 44

Figure 20. Développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19) 46

Figure 21. Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19) 47

Figure 22. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19) 48

Figure 23. Exemples de développement racinaire de plants d'Épinette blanche régénérés naturellement (99/10/01) .. 50

Figure 24. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) – dispositif P94.3 Bouleau jaune 52

Figure 25. Plant de Bouleau jaune (dispositif P94.3 – récipient *1-350A*) à la cinquième année (1999) de plantation..... 53

Figure 26. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) – dispositif P94.3 Chêne rouge 54

Figure 27. Plant de Chêne rouge (dispositif P94.3 – récipient *25-350A*) à la cinquième année (1999) de plantation..... 55

Figure 28. Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) – dispositif P94.4 Chêne rouge 57

Figure 29. Plant de Chêne rouge (dispositif P94.4 – récipient *1-1050A*) à la cinquième année (1999) de plantation..... 58

Figure 30. Développement racinaire de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21) 60

Figure 31. Exemples de développement racinaire de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21)..... 62

Figure 32. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21) .. 63

Figure 33. Exemples de développement racinaire de plants de Bouleau jaune régénérés naturellement (99/07/07).. 64

Figure 34. Développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)..... 66

Figure 35. Exemples de développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14) 69

Figure 36. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)..... 70

Figure 37. Développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15) 72

Figure 38. Exemples de développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15) 73

Figure 39. Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15) 74

Figure 40. Exemples de développement racinaire de plants de Chêne rouge régénérés naturellement (99/06/29).. 75

Figure 41. Résumé des analyses statistiques à la cinquième année dans les plantations..... 78

Introduction

Les malformations racinaires affectent la croissance et la qualité du développement des jeunes peuplements et augmentent la vulnérabilité des racines aux attaques par les pathogènes (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Les racines déviées par les parois des récipients causent des malformations racinaires qui peuvent entraîner à long terme des problèmes de croissance (GILMAN et KANE 1990), le renversement de l'arbre et sa mort (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Les problèmes associés aux malformations du système racinaire sont une augmentation du stress hydrique, de l'incidence des maladies, de la mortalité et une diminution de la résistance au vent (HAASE *et al.* 1993). Les malformations des racines inhérentes à la culture en récipients, peuvent mettre en péril la stabilité des plants (HALTER *et al.* 1993). Les déformations des racines peuvent également affecter la qualité du bois (LINDSTRÖM 1978, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Les arbres peuvent souffrir de problèmes majeurs de qualité de la fibre même si les plantations ne sont pas assez affectées par les malformations racinaires pour être renversées (BRINKMAN 1995). Plusieurs des arbres destinés au marché du sciage ne seront bons que pour le marché de la pâte. Des tests sur la qualité de la fibre des racines sous-entendent une perte de la limite d'élasticité (BRINKMAN 1995). Une fois établies, les malformations des racines sont permanentes. Même si ces déformations peuvent se corriger partiellement, elles réduisent la stabilité des arbres. Certains arbres peuvent toutefois avoir plus tard un excellent développement racinaire (GRENE 1978a).

Les problèmes de stabilité des plants peuvent commencer dès la fin de la cinquième année en plantations dépendant du taux de croissance des plants et durer sur une longue période (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Les répercussions des déformations des racines sur la croissance aérienne ne se font toutefois généralement pas sentir pendant la première décennie de la plantation (DELEPORTE 1982). Les malformations aux systèmes racinaires demeurent un danger caché pour les forêts issues de plantations (GRENE 1978a, b). Les conséquences des malformations des racines peuvent survenir à n'importe quel moment de la durée de vie du peuplement (GRENE 1978a). Selon LINDSTRÖM (1978), il y a peu d'information sur les pertes de croissance imputables aux malformations des racines. Ceci peut être dû au fait que les effets peuvent se manifester très longtemps après la plantation. GIROUARD (1995) mentionne qu'il n'y a toujours pas de preuve évidente des effets des malformations aux systèmes racinaires sur la performance des semis en plantations.

En 1999, 152 millions de semis ont été produits au Québec dans le réseau des pépinières du Fonds forestier et des pépinières privées (GAGNON *et al.* 2000). Quatre-vingt-sept pour cent de la production a été réalisée dans des récipients tandis que treize pour cent s'est faite à racines nues. Les essences les plus produites sont l'Épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), l'Épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss) et le Pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) qui comptent pour 52,7 %, 22,2 % et 19,0 % de la production totale. La culture de plants feuillus représente seulement 0,8 % de la production totale.

Deux méthodes s'offrent aux producteurs de plants pour diminuer les malformations aux systèmes racinaires induites par la culture en récipients : l'application d'une solution de carbonate de cuivre ($CuCO_3$) sur les parois intérieures des cavités ou l'utilisation de récipients à parois ajourées (polyéthylène ou tissus). Les expériences réalisées par GINGRAS (1994) ainsi que par plusieurs auteurs ont permis de démontrer l'efficacité du cuivre à produire des systèmes racinaires exempts de malformations racinaires et préciser la concentration du $CuCO_3$ et la méthode d'application sur les parois internes des cavités.

Les récipients à parois ajourées permettent, grâce au cernage aérien, de produire des systèmes racinaires moins déformés avec une bonne proportion de racines horizontales sans l'utilisation de substance chimique (HUANG et AI 1992). La croissance des racines est stoppée lorsqu'elles atteignent la couche d'air, et ceci induit une ramification et une croissance des racines latérales. Le système racinaire ainsi produit possède une architecture qui se rapproche de celle observée en conditions naturelles (GRENE 1978a). Le cernage aérien favorise le développement des racines secondaires et réduit l'incidence de l'enroulement des racines qui peut occasionner une croissance

réduite et une installation lente en plantation (HUANG et LIANG 1988).

Selon HUANG et AI (1992), les avantages de produire dans des récipients à parois ajourées sont l'élimination de la déformation des racines, l'orientation adéquate du système racinaire, la croissance vigoureuse des racines, l'économie en engrais et l'augmentation de la production des plants. Selon LINDSTRÖM (1995), plus le cernage aérien est utilisé efficacement, plus on se rapproche du système racinaire d'un semis naturellement établi. À titre d'exemple, les travaux de VAN EERDEN (1978) montrent pour l'Épinette blanche et le Sapin de Douglas (*Pseudostuga menziesii* [Mirb.] Franco), qu'une plus grande proportion des racines croissent horizontalement à partir d'extrémités de racines le long des côtés de la motte. Ces racines proviennent de points de croissance créés par le cernage aérien. La culture de semis dans des récipients à parois ajourées, quoique plus délicate en raison de l'irrigation, permet de produire des semis très équilibrés avec beaucoup moins de malformations racinaires (GINGRAS 1993, GINGRAS et RICHARD 1999). Les travaux de GINGRAS 1993 et GINGRAS et RICHARD 1999 ont permis de concevoir le dessin d'un récipient à parois ajourées adapté à la production de plants de fortes dimensions (PFD). Selon GRENE (1978a), le cernage aérien est la meilleure approche pour produire les semis.

La durée de culture en récipients est un facteur important sur la stabilité future des semis dans les plantations ainsi que sur leur vulnérabilité aux pathogènes des racines. Ces problèmes (stabilité et pathogènes) peuvent être diminués en utilisant des récipients à parois ajourées ou des récipients de plus fort volume (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). La stabilité est améliorée par l'utilisation de récipients cylindriques à parois perméables aux racines, ou par des conteneurs de section carrée à parois non perméables aux racines mais présentant des côtes internes marquées et ayant été traitées au cuivre afin d'assurer un cernage chimique des racines (CRÉMIÈRE 1994). Le cernage aérien est actuellement retenu par plusieurs compagnies qui conçoivent des récipients pour la culture des semis en pépinières (LINDSTRÖM 1990, MARCELLI 1993, STUEWE & SONS 1999).

Des récipients où chaque cavité est entièrement exposée à l'air sont également disponibles. Le système Jiffy® (Jiffy Products Ltd., New-Brunswick) propose un récipient composé de pastilles de tourbe entourées d'un treillis souple qui assure un cernage aérien complet. Les semis cultivés dans le système Jiffy® produisent des systèmes racinaires plus naturels peu de temps après la plantation. Le système racinaire comporte des racines latérales de support qui sont du même âge que le semis contrairement aux racines adventives des plants produits dans des récipients à parois pleines qui sont plus jeunes que le plant (BALISKI *et al.* 1995). Au moment de la plantation, les semis produits dans le système Jiffy® possèdent un système racinaire qui est en mesure d'explorer rapidement dans toutes les directions les horizons organique et minéral et ainsi accéder aux ressources essentielles à sa croissance (BALISKI *et al.* 1995). Selon LINDSTRÖM (1978, 1997) il n'y a peu ou aucun problème de malformations des racines pour les plants cultivés dans un substrat entièrement entouré d'air. Les racines peuvent toutefois traverser d'une motte de tourbe à l'autre durant la culture. Il est alors essentiel de trancher les racines avant de tenter de les séparer.

Pour les chercheurs et les fabricants d'équipements, l'objectif est de fabriquer des récipients qui vont permettre de produire dans les pépinières des semis avec un développement racinaire similaire à celui des semis naturels (BALISKI *et al.* 1995). Sans égard aux techniques culturales impliquées, des efforts doivent être entrepris pour maintenir la structure horizontale des racines latérales (VAN EERDEN 1978). COGLIASTRO *et al.* (1995) suggèrent qu'un contenant de forme carrée, pourvu de parois ajourées, d'un fond très ouvert et d'un volume de plus de 1000 cm^3, permettrait la production de plants de fortes dimensions d'espèces feuillues à pivot avec un minimum de malformations racinaires.

En plus de l'effet du récipient, la préparation de terrain, la mise en terre des plants et l'entretien de la plantation ont un effet direct sur la performance des plants et la formation du système racinaire. Les arbres peuvent présenter une réduction de croissance de la partie aérienne et racinaire et même mourir quand le taux d'oxygène dans le sol est faible. Ces conditions, souvent associées aux inondations et aux sols fortement compactés, prévalent également dans les sols à texture lourde (KOZLOWSKI 1986). Des études réalisées par JOBIDON et CHARETTE (1997) démontrent que des travaux de dégagement dans les plantations permettent des gains en croissance du diamètre et de la hauteur pour l'Épinette noire après dix ans. Les travaux menés par MUNSON *et al.* (1993) avec le Pin blanc (*Pinus strobus* L.) et l'Épinette blanche montrent que les travaux de préparation de terrain et de répression de la végétation compétitive affectent le statut nutritif du sol et la performance des plants.

Le but de nos expériences est d'évaluer cinq ans après la mise en terre la performance de semis (Épinette noire, Épinette blanche, Bouleau jaune [*Betula alleghaniensis* Britton (syn. *Betula lutea* Michx. f.)] et Chêne rouge [*Quercus rubra* L.]) produits dans des récipients à parois ajourées. L'hypothèse de départ est donc la suivante : « les semis (conifères et feuillus) produits dans des récipients à parois ajourées possèdent une structure racinaire plus horizontale et moins déformée ce qui leur permet d'avoir en plantation une distribution des racines, un taux de survie, une croissance et une stabilité supérieurs aux plants produits dans des récipients à parois pleines. »

Les objectifs spécifiques à notre démarche expérimentale sont les suivants :

- évaluer la performance en plantations des plants cultivés dans des récipients à parois ajourées;
- quantifier et qualifier le développement racinaire dans les plantations;
- valider les caractéristiques du récipient à parois ajourées *25-350A* (IPL inc., Saint-Damien [Québec]);
- formuler des recommandations à la Direction de la production des semences et des plants du ministère des Ressources naturelles à l'égard du récipient qui devrait être utilisé pour les productions à grande échelle de PFD ainsi que pour les productions feuillues.

Chapitre premier

Notions de développement racinaire

Ce chapitre présente quelques notions sur le développement racinaire pour l'Épinette noire, l'Épinette blanche, le Bouleau jaune et le Chêne rouge ainsi que sur les conséquences des malformations des racines en plantations.

1.1 Rôles et fonctions des racines

En plus du support physique qu'elles procurent aux plants, les racines ont deux fonctions physiologiques importantes. L'une est l'absorption de l'eau et des sels minéraux nécessaires à la pérennité et à la croissance, l'autre est le transport de ces éléments vers la partie aérienne (DELEPORTE 1982, FARRISH 1991).

La croissance des racines dépend largement de la photosynthèse courante. Cette dernière dépend à son tour des variables environnementales (température, humidité relative et déficit de pression de vapeur) et de l'état hydrique du sol. La croissance est limitée par l'absorption de l'eau et est donc fonction de la croissance des racines. La croissance du système racinaire et la photosynthèse dans les plants nouvellement mis en terre sont donc interdépendants (BURDETT 1990). Une expérience réalisée avec des plants de Sapin de Douglas et d'Épinette de Sitka (*Picea sitchensis* [Bong.] Carr.) a montré que les nouvelles racines formées par des plants marqués au $^{14}CO_2$ après douze jours de croissance présentaient une forte radioactivité. Ceci indique que les produits inhérents à la photosynthèse constituent la source première de carbone pour les nouvelles racines (VAN DEN DRIESSCHE 1987). PELLICER *et al.* (2000) ont démontré que 80 % du carbone des nouvelles racines de boutures de Mélèze (*Larix x eurolepis* A. Henry) provient du carbone fraîchement assimilé. L'établissement d'un plant mis en terre est essentiellement lié à sa capacité de produire de nouvelles racines (VAN DEN DRIESSCHE 1987).

La performance d'un semis sur un site de reboisement dépend de son potentiel de croissance inhérent et du degré de son potentiel de croissance que les conditions environnementales du site lui permettent d'exprimer (GROSSNICKLE et FOLK 1993). Les semis peuvent être exposés à des stress dès leur mise en terre. Ceci est généralement attribuable au stress hydrique en raison du confinement des racines, de leur pauvre contact avec le sol et de la faible perméabilité des racines qui limitent l'absorption de l'eau du sol pour faire face à la demande en transpiration de la partie aérienne (GROSSNICKLE et FOLK 1993). Le stress de la mise en terre peut être vaincu seulement si les processus physiologiques essentiels au développement morphologique, principalement la croissance du système racinaire, se produisent. S'il y a croissance des racines sur les semis fraîchement mis en terre, le stress hydrique est réduit et le système physiologique peut réagir normalement (GROSSNICKLE et FOLK 1993). Les difficultés pour un semis de s'établir et de croître en plantations dépendent en grande partie de la rapidité du développement de son système racinaire (HUANG et LIANG 1988).

1.2 Système racinaire des conifères

1.2.1 Plants naturellement établis

Le système racinaire naturel des conifères se caractérise par un développement horizontal peu profond (COUTTS 1989, HALTER et CHANWAY 1993) avec une grande surface répartie dans quelques grosses racines latérales de premier ordre, une absence de déformations et une distribution uniforme des racines (GRENE 1978b, LINDSTRÖM 1990, LINDSTRÖM 1995, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). La surface du système racinaire est une mesure de la taille des racines. Elle est obtenue en additionnant toutes les surfaces des racines qui traversent un cylindre imaginaire à une distance donnée (ex. : 10 centimètres) de l'axe de la tige (SUTTON ET TINUS 1983). Le système racinaire des arbres naturels, bien que variable, est généralement bien équilibré et a une configuration ouverte (VAN EERDEN 1978). Les racines se développent principalement dans la partie la plus favorable du sol à l'interface des horizons organique et minéral (BALISKI *et al.* 1995). Les semis naturels rencontrent les deux critères essentiels pour obtenir un arbre stable, soit une grande surface racinaire et une bonne distri-

bution des racines (DELEPORTE 1982, LINDSTRÖM 1990, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Les semis régénérés naturellement ont un plus grand nombre de racines latérales de premier ordre dans les dix premiers centimètres de sol et la distance de la première racine de structure par rapport à la surface est moindre que pour les semis plantés (HALTER ET CHANWAY 1993, HALTER *et al.* 1993). Entre 70 et 79 % des racines latérales primaires des semis régénérés naturellement se retrouvent dans les dix premiers centimètres de sol en comparaison de 30 à 42 % pour les semis plantés (HALTER ET CHANWAY 1993).

Le développement des racines débute par l'élongation de la radicule qui est appelée par la suite racine principale. La radicule a un géotropisme positif, c'est-à-dire qu'elle s'allonge verticalement vers le bas. Si la racine principale est déviée de sa course verticale (orthogéotropique), elle se replie vers le bas dès que l'obstacle est franchi (COUTTS 1989). Une racine orthogéotropique est une racine verticale dont l'orientation est déterminée par la gravité et qui produit un axe vertical (Sutton et TINUS 1983). La présence d'une racine principale orientée verticalement, généralement absente pour les semis produits dans des récipients, est plus importante pour la stabilité des jeunes semis et leur capacité à assimiler l'eau que pour leur développement à venir (PREISIG *et al.* 1979). Les racines latérales de premier ordre se développent par la suite en ordre acropète, c'est-à-dire que la première est près du collet et les autres sont de plus en plus loin de celui-ci. Les racines latérales croissent horizontalement (plagiogéotropique) ou elles sont inclinées selon un certain angle (COUTTS 1989). Une racine horizontale ou oblique dont l'orientation est déterminée par la gravité et qui produit un axe horizontal ou oblique est appelée plagiogéotropique. Lorsque les racines sont déviées de leur course originelle par des obstacles dans le sol, des courbes de correction interviennent pour que leur croissance se poursuive en s'éloignant de la tige. Si l'apex meurt, les racines de remplacement continuent de croître dans la direction de l'axe principal de la racine (COUTTS 1989). Les racines sont divisées en deux classes : celles qui se développent directement à partir du tronc ou au-dessus des racines primaires, appelées adventives et celles qui croissent à partir des racines existantes au moment de la plantation (GILMAN et KANE 1990). Une racine adventive est une racine qui se développe sur un organe autre que les racines ou hors de sa séquence normale de développement (SUTTON et TINUS 1983).

Les racines de l'Épinette noire peuvent parfois atteindre 60 cm de profondeur. Néanmoins la plupart s'étendent latéralement à l'interface mousse - humus. La plus grande partie de la biomasse des racines est dans les vingt premiers centimètres de sol organique (BURNS *et al.* 1990). S'il y a une accumulation rapide de matière organique au sol, des racines adventives peuvent se développer avec un fort taux de croissance (BURNS *et al.* 1990).

L'Épinette blanche est essentiellement caractérisée par un système racinaire peu profond. La profondeur de l'enracinement se situe généralement entre 90 et 120 cm. Toutefois, la racine principale et certaines racines plongeantes peuvent atteindre des profondeurs de trois mètres. Quatre-vingt-cinq pour cent de la biomasse des racines se situe normalement dans les 15 à 30 premiers centimètres de sol (BURNS *et al.* 1990).

1.2.2 Plants mis en terre

Le développement du système racinaire de semis cultivés dans des récipients présente des différences majeures par rapport à celui des semis naturellement établis (GINGRAS et RICHARD 1999). La période de croissance en pépinière conditionne fortement l'architecture des racines. En effet, la culture des semis en récipients induit des malformations au système racinaire qui persistent sur les sites de reboisement. Une malformation peut se définir comme toute déviation (racine coudée, racine développée en spirale, ...) par rapport à la forme d'un système racinaire développé naturellement dans un site analogue. Les plants mis en terre mettent en évidence une variété de malformations des racines : étranglement, enroulement, ... qui ne sont pas présentes pour les semis naturels (HALTER *et al.* 1993). En pratique, tous les arbres plantés subissent des déformations de leur système racinaire (GILLGREN 1975, PERSSON 1982).

Contrairement aux racines des plants régénérés naturellement qui sont libres d'explorer le sol à toutes les profondeurs, la croissance des racines d'un semis cultivé en récipient est largement limitée à la base de la carotte pendant la première saison en plantations. Les racines de deuxième et de troisième ordre ont tendance à se développer près de la surface. Ces racines n'offrent toutefois pas le support des racines latérales de premier ordre (BALISKY *et al.* 1995). La forme générale du système racinaire de semis d'Épinette noire cultivés en récipients est superficielle (GIROUARD 1995).

L'architecture de base du système racinaire peut être façonnée durant les premières années de la vie d'un arbre (BURDETT *et al.* 1986). Une étude réalisée par COUTTS (1983) démontre que plusieurs des racines principales d'Épinette de Sitka âgée de

34 ans étaient déjà parmi les plus grosses dès l'âge de deux à trois ans. Certaines petites racines continuent de pousser jusqu'à 18 ans pour devenir une composante importante du système racinaire. Le patron du système racinaire est visible six ans après la plantation quand certaines des racines principales ont environ un centimètre de diamètre à une distance de 20 cm du centre de la souche (COUTTS 1983). Les semis mis en terre ont plus de racines de plus petit format (PREISIG *et al.* 1979) qui se développent en configuration dense tandis que les semis naturels ont moins de racines par système racinaire et relativement plus de racines latérales de gros format (VAN EERDEN 1978). Les Épinettes de Norvège (*Picea abies* [L.] Karst.) régénérées naturellement ont relativement peu de racines qui sont fortes et bien distribuées tandis que les arbres mis en terre ont plus de racines mais elles sont moins solides (GRENE 1978b).

La faiblesse la plus importante des semis cultivés en récipients est la réorientation des racines primaires de support latéral de leur position naturelle horizontale ou oblique à verticale (BALISKY *et al.* 1995). Le dessin du récipient est un facteur majeur causant des malformations au système racinaire (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994), lesquelles augmentent proportionnellement avec la durée de culture en pépinière (GRENE 1978a, LINDSTRÖM 1978, SHEEDY 1990). Selon LINDSTRÖM (1990), les problèmes de stabilité tendent à augmenter avec la durée de culture en récipients. Le volume du récipient semble également important pour la stabilité des plants. Les semis produits dans de gros récipients ont une croissance des racines plus forte après la mise en terre (LINDSTRÖM 1990). Les études de GIROUARD (1995) ont démontré que plus de systèmes racinaires déformés ont été trouvés sur des semis d'Épinette noire et de Pin gris dans un récipient de 50 cm^3 que dans un récipient de 110 cm^3. Les travaux de GIROUARD (1992) sur le Pin gris ont également démontré qu'une augmentation de la durée de culture en récipients se traduit par une diminution de la croissance en hauteur des plants en plantations.

L'examen des racines de sapins âgés de douze ans renversés manuellement, montre dramatiquement bien les malformations induites aux racines par la culture en récipients (BRINKMAN 1995). La forme du récipient dans lequel les semis ont été produits était très évidente quand les systèmes racinaires de Sapin de Douglas et de Pin lodgepole (*Pinus concorta* var. *latifolia* Engelm.) ont été analysés onze ans après leur mise en terre (HALTER et CHANWAY 1993). Les études réalisées par GIROUARD (1995) démontrent, plusieurs années après la mise en terre, que la forme du système racinaire tend à persister pour les semis d'Épinette noire et de Pin gris cultivés dans des récipients. La qualité et le développement du système racinaire de Pins gris (âgés de cinq et dix ans) sont douteux. La très grande majorité des plants cultivés dans des récipients présentent un système racinaire fortement déformé (SHEEDY 1993). Selon SHEEDY (1996), la qualité du système racinaire de Pin gris ne s'est pas améliorée entre la cinquième et la dixième année de plantation. Bien qu'il y ait plus de racines et plus de chevelu, la présence et l'importance des malformations du système racinaire ont nettement augmenté. Une fois établies, les malformations semblent persister, quoiqu'elles peuvent partiellement se corriger dans le temps (GRENE 1978b).

Plusieurs auteurs sous-entendent que les effets de la culture en récipients sur le système racinaire s'amenuisent avec le temps. Cependant, des anomalies de structure sont clairement apparentes sur le système racinaire de plants de Pin tordu (*Pinus concorta* var. *concorta* Dougl.) onze ans après la plantation (HALTER *et al.* 1993). Selon les travaux de LINDSTRÖM (1995), les racines vrillées de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) ne sont plus visibles à l'œil à l'âge de vingt ans. La plupart de ces racines se sont cicatrisées mais la conséquence peut être de produire un bois de qualité inférieure. Les racines peuvent toujours être faiblement attachées à la tige vingt ans après. Selon GILLGREN (1975) les déformations s'estompent avec la croissance des racines. Les systèmes racinaires déformés en spirale sont cachés progressivement par la croissance en diamètre des racines et sont recouverts par un manteau de bois au grain parallèle normal. Avec le temps, ils prennent une apparence plus normale (PERSSON 1982). Selon GILLGREN (1975), les racines déformées peuvent se développer de manière totalement satisfaisante.

Dans le cas où un système racinaire comporte des racines enroulées autour de la motte, la croissance va s'effectuer au détriment de ces racines. Dans cette situation, le flux des produits de la photosynthèse vers le bas dans le phloème est en apparence restreint, ce qui provoque une prolifération de la croissance racinaire au-dessus du point de resserrement. L'augmentation de l'initiation et de l'élongation des racines latérales au-dessus du point de resserrement semble être favorisée par l'accumulation des glucides dans cette zone (HAASE *et al.* 1993, PREISIG *et al.* 1979).

1.2.3 Racines adventives

Une caractéristique très importante pour les Épinettes est leur capacité de produire des racines adventives. Ces racines se

forment à partir de l'hypocotyle, à la base de la tige ou des branches latérales ou au-dessus des premières racines latérales formées lors de la culture en pépinière (COUTTS 1983). Les Épinettes ont une plus grande habileté à développer des racines adventives que les Pins (LINDSTRÖM 1978). En regard des espèces, les déformations des racines sont plus importantes pour les Pins que pour les Épinettes. Contrairement aux Pins, les Épinettes peuvent contrer les malformations du système racinaire en produisant des racines adventives (LINDSTRÖM 1990, SHEEDY 1990). Les travaux de ATZMON *et al.* (1994) avec le Pin parasol (*Pinus pinea* L.) démontrent que la compétition à l'intérieur du système racinaire pour les produits de la photosynthèse, entre l'apex de la racine principale et les racines latérales, joue un rôle important dans la détermination de la morphologie du système racinaire. En raison de leur capacité à produire des racines adventives, les semis d'Épinette blanche peuvent rapidement avoir raison de l'empreinte et des effets du système racinaire produit en récipients. Conséquemment, le risque de renversement de cette espèce semble minimal (VAN EERDEN 1978). SHEEDY (1990) a trouvé que 95 % des semis de Pin gris présentaient des malformations à leurs systèmes racinaires contre 65 % pour l'Épinette noire.

Le problème des malformations des racines est notamment évident pour le Pin sylvestre et le Pin tordu. Ces essences n'ont pas la capacité que possède l'Épinette de Norvège de former des racines adventives qui améliorent le système racinaire inadéquat au moment de la plantation (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). La formation de racines adventives est une caractéristique de l'Épinette de Norvège qui augmente sa capacité à s'adapter à différentes conditions rencontrées sur les sites de reboisement (GRENE 1978a). Les Épinettes produisent un système racinaire presque naturel grâce aux racines adventives (BALISKI *et al.* 1995). Lorsque les semis d'Épinette sont mis en terre plus profondément, ils forment des racines adventives (GIROUARD 1995). Pour l'Épinette de Sitka mise en terre, 95 % des arbres ont au moins une des cinq plus grosses racines latérales qui est d'origine adventive contre 11 % pour les plants semés en plantation. En moyenne, par rapport aux cinq plus grosses latérales, 2,31 racines sont d'origine adventive contre 0,17 pour le traitement ensemencé directement en plantation (COUTTS *et al.* 1990). Les principales racines sont fréquemment d'origine adventive mais certaines apparaissent à partir du système racinaire (COUTTS 1983).

La formation de racines adventives se retrouve également sur les semis produits à racines nues. L'Épinette de Norvège compense la contrainte que l'on fait subir à son système racinaire d'origine par le développement ou la création de racines qui ont, après quatre ans, un faible diamètre et se situent un peu en dessous du collet, au-dessus de la courbe de déformation (DELEPORTE 1982).

Les racines adventives qui se forment à partir de la tige peuvent croître plus vigoureusement que celles qui proviennent du système racinaire d'origine pour des raisons associées à leur position dans la partie supérieure du profil du sol, la section la plus favorable et aussi en raison de facteurs internes (COUTTS *et al.* 1990). Les apex des racines adventives ont un diamètre plus important que ceux des autres racines. Le diamètre de l'apex est corrélé de près à celui de la stèle et du xylème primaire. Ce dernier est corrélé avec le taux d'extension des racines (Coutts 1983). Selon GRENE (1978a) la formation des racines adventives retarde temporairement la croissance des arbres. La formation de racines adventives peut également survenir dans les cas de conditions difficiles sur les sites de reboisement. Un plus grand nombre de racines adventives, une augmentation de la ramification des racines plus profondes et aucun développement de racine principale ont été notés dans les sols compacts et dans les sols non compacts à faible teneur en O_2 (GILMAN *et al.* 1987).

1.3 Système racinaire des feuillus

1.3.1 Plants naturellement établis

Le Bouleau jaune a un système racinaire latéral extensif adaptable bien développé. Ses racines sont capables de s'étendre horizontalement dans un sol peu profond ou pénétrer à des profondeurs de plus de 1,5 m sous des conditions favorables. Le développement racinaire de semis naturels (25 ans) de Bouleau pleureur (*Betula pendula* Roth) et de Chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) se situe en grande partie (90 %) dans les cinquante premiers centimètres de sol (BENEDEAU et AUCLAIR 1989). De plus, le Bouleau jaune produit fréquemment des greffes de racines (BURNS *et al.* 1990).

Le développement des racines des Chênes commence par l'élongation de la radicule qui donne naissance à la racine principale ou pivot qui est orthogéotrope (BEISSALAH *et al.* 1988, LAMOND *et al.* 1983). Si un obstacle détourne temporairement le pivot de cette direction de croissance, il la retrouve dès que l'obstacle est contourné. Ce comportement est l'expression d'un géotropisme positif (BEISSALAH *et al.* 1988). Les racines déviées par des obstacles dans le sol reviennent

fréquemment à leur orientation d'origine et assurent ainsi une bonne prise dans le sol (GILMAN et KANE 1990). La croissance initiale du pivot est indéterminée et linéaire (PAGES et SERRA 1994). Les racines secondaires ou de premier ordre, apparaissent normalement à une distance de 6 à 10 cm de l'apex du pivot. Elles sont semi-plagiogéotropes, mais jamais orthogéotropes (LAMOND *et al.* 1983). Bien qu'en nombre et à distance les unes des autres variables, les racines latérales se développent pour l'essentiel en ordre acropète (BEISSALAH *et al.* 1988, PAGES et SERRA 1994). L'extension d'un système racinaire peut être analysée comme le résultat de deux processus fondamentaux : la croissance et la ramification (PAGES et SERRA 1994). La densité des racines par unité de longueur est stable le long du pivot et le nombre de racines par unité de temps est grossièrement proportionnel au taux de croissance (PAGES et SERRA 1994). Le système racinaire naturel du Chêne pédonculé présente un épais pivot vertical, à croissance durable, sur lequel naissent des racines secondaires, fines et à croissance axiale généralement limitée (LAMOND *et al.* 1983). Le système racinaire du jeune plant de Chêne vert (*Quercus ilex* L.) est similaire à celui du Chêne pédonculé (BEISSALAH *et al.* 1988). Les travaux menés par ASHBY (1995) montrent que sur un ancien sol minier (charbon) remis en condition, la profondeur d'enracinement pour les Chênes à gros fruits (*Quercus macrocarpa* Michx.), les Chênes des marais (*Quercus palustris* Muenchh.), les Chênes jaunes (*Quercus prinus* L.) et les Chênes pédonculés dépasse grandement la croissance en hauteur des arbres après trois ans (ensemencement sur le site de plantation).

Les études réalisées par WATSON et HIMELICK (1982) établissent qu'en général, la distribution verticale des racines de structure des feuillus évalués (Érable de Norvège [*Acer platanoides* L.], Érable rouge [*Acer rubrum* L.], Érable à sucre [*Acer saccharum* Marsh.], Frêne rouge [*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.], Gainier rouge [*Cercis canadensis* L.] et Chêne des marais) montre le plus grand développement à une profondeur variant de 13 à 38 cm. La croissance est limitée dans les douze premiers centimètres et diminue en dessous de 38 cm de profondeur. La densité du système racinaire fibreux est généralement plus grande dans les vingt premiers centimètres de sol.

Environ 80 % de la biomasse et 82 % de la surface occupée par les racines fines du Pin loblolly (*Pinus taeda* L.), du Chêne à feuilles falciformes (*Quercus falcata* Michx.), de l'Érable rouge, du Copalme d'Amérique (*Liquidambar styraciflua* L.), du Chêne gris (*Quercus nigra* L.), du Cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.) et du Sassafras officinal (*Sassafras albidum* [Nutt.] Nees), sont comprises dans les quarante premiers centimètres de sol (FARRISH 1991). La biomasse et la surface occupée par les racines fines décroissent abruptement avec l'augmentation de la profondeur sur tous les sites. Entre 60 à 64 % de la biomasse et 63 à 70 % de la surface occupée par les racines se retrouvent dans les vingt premiers centimètres de sol. La concentration de racines fines dans ces sols forestiers décroît rapidement en réaction aux conditions non favorables du sol, telles une saturation prolongée en eau et une sécheresse (FARRISH 1991).

1.3.2 Plants mis en terre

Les travaux de GILMAN et KANE (1990) montrent qu'il y a eu plus de racines adventives formées (7,6) après la plantation que de racines formées à partir du système racinaire existant (4,2) pour l'Érable rouge, ce qui va dans le même sens que les observations de COUTTS (1983). Les racines adventives se développent dans les cinq premiers centimètres de sol au-dessus du système racinaire d'origine. La croissance à long terme des essences qui produisent peu de racines adventives, peut être plus perturbée par les malformations racinaires (GILMAN et KANE 1990). Dans le cas de l'Érable rouge, les malformations occasionnées par la culture en récipients peuvent ne pas avoir d'effet à long terme puisque la plus grande partie de son système racinaire s'est formée au-dessus de la carotte d'origine.

1.4 Conséquences des malformations racinaires

La forme des racines est déterminante pour la stabilité de l'arbre en plantation (BURDETT *et al.* 1986). Certains types de récipients peuvent avoir des conséquences défavorables sur la croissance et surtout sur la stabilité des plants en raison de quelques déformations aux racines dont la fréquence et les effets sont inégaux. La stabilité paraît être liée à la forme et au dessin du récipient mais également à son volume, sans qu'il soit possible de départager ces deux facteurs (CRÉMIÈRE 1994). Les effets de la culture en récipients pour le Pin tordu durent plus longtemps que pour l'Épinette. Les Pins ne produisent pas de racines adventives, ce qui les rend plus vulnérables aux chablis (VAN EERDEN 1978). Selon SHEEDY (1991), les Pins gris instables présentent souvent une croissance et un développement inférieurs à ceux des plants stables.

Les problèmes associés aux malformations des racines ne sont pas exclusifs au milieu forestier. En effet, les arboriculteurs con-

tinuent de citer comme raison majeure, pour le déclin et la mort des arbres, la faible qualité des systèmes racinaires (APPLETON 1995). La compression des racines augmente également le risque d'infection par l'Armillaire (*Armillaria sp.*) ou Pourridié-agaric (LINDSTRÖM 1995). Une étude américaine montre que les malformations aux systèmes racinaires occasionnées par la culture en récipients peuvent causer une infection mortelle par l'Armillaire (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). BRINKMAN (1995) rapporte que des plantations de Pins sont infectées à 50 % par l'Armillaire en comparaison à sept pour cent pour les peuplements naturels. Le même phénomène est observé pour les plantations d'Épinette où le taux d'infection atteint 30 %. Dans une étude sur la stabilité des plants, les systèmes racinaires de Pins sont fortement infestés par l'Armillaire. Aucun rhizomorphe de ce champignon pathogène n'a été trouvé sur des semis naturels du même âge. Les malformations du système racinaire pourraient être la raison de la persistance de la maladie (LINDSTRÖM 1995, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994) car normalement, cette maladie décroît rapidement quinze ans après la mise en terre.

Sous certaines conditions environnementales, la déviation des racines par rapport à ce qui est admis comme normal ou naturel peut prédisposer des arbres de certaines espèces, principalement les Pins, à une instabilité juvénile ou à des bris (VAN EERDEN 1978). Des recherches sur les Pins ont indiqué que les plants mis en terre, âgés de trois à douze ans, passent par des changements de morphologie de leurs systèmes racinaires qui peuvent entraîner l'instabilité ou l'inclinaison des arbres (HALTER *et al.* 1993). Le développement en spirale des racines et la formation de racines en Z (du bas vers le haut) peuvent causer de l'instabilité et réduire les fonctions de stabilisation de la racine principale et des racines latérales (LINDSTRÖM 1997). Pour le Pin tordu, une trop longue période de culture en récipients peut entraîner des problèmes d'inclinaison et de stabilité (LINDSTRÖM 1995). CRÉMIÈRE (1994) a observé à cinq ans un effet du type de récipient sur la stabilité, que ce soit l'écart à la verticalité mesurée ou le pourcentage d'arbres stables.

La surface racinaire est fortement corrélée à la stabilité des arbres. Il semble que plus les malformations aux systèmes racinaires augmentent, plus la surface des racines diminue et conséquemment la stabilité diminue (GRENE 1978b). La surface totale des racines et le degré de déformation sont d'une importance primordiale pour la fonction stabilisatrice des racines. Un gros système racinaire ne compense pas les déformations graves (LINDSTRÖM 1995). Selon GRENE (1978a), la surface des racines et la stabilité sont supérieures pour les plants semés en place, légèrement moindres pour les semis à racines nues et beaucoup moindres pour les plants produits en récipients. CRÉMIÈRE (1994) note une tendance à l'augmentation des déformations des racines avec l'instabilité des plants. Les racines déformées croissent ensemble par greffage de leurs tissus vasculaires, mais les capacités de translocation décroissent. Ceci mène à une réduction de la croissance racinaire qui peut diminuer la stabilité de l'arbre (GRENE 1978b).

DELEPORTE (1982) mentionne que les déformations du système racinaire des Sapins de Douglas, toujours visibles quatre ans après la mise en terre, n'influencent pas la croissance en hauteur. Il est toutefois trop tôt pour conclure quant aux effets des déformations des racines sur la stabilité. L'architecture des systèmes racinaires déformés est moins bien équilibrée que celle des témoins (racines non déformées volontairement). CRÉMIÈRE (1994) rapporte que, malgré l'observation de déformations aux racines sur des plants de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) âgés entre trois et dix ans, aucun problème majeur n'a, jusqu'à maintenant, été constaté dans les plantations réalisées avec des plants produits en récipients de moins d'un an. GIROUARD (1995) et SHEEDY (1991, 1993, 1996) ont montré que la stabilité, la survie et la croissance de la grande majorité des plants d'Épinette noire et de Pin gris étaient satisfaisantes malgré que le développement du système racinaire soit douteux. Dans son étude de 1996, SHEEDY montre que la stabilité des plants dans six plantations de Pin gris s'est nettement améliorée au cours des cinq dernières années. LINDSTRÖM (1995) et LINDSTRÖM et HÅKANSSON (1994) ont observé le même phénomène pour les Pins âgés entre dix et vingt ans en plantation. Selon LINDSTRÖM (1990), certains secteurs de régénération artificielle pourraient être vulnérables dans l'avenir. Toutefois, aucun des sites étudiés n'a montré des indications de problèmes de stabilité après sept et huit ans en plantation.

Une étude réalisée par HUNTER et MAKI (1980) montre que des malformations induites volontairement aux racines au moment de la mise en terre de Pin loblolly n'ont pas modifié significativement la survie, la croissance ou la forme de l'arbre durant les 24 années de la vie du peuplement. Selon PREISIG *et al.* (1979), la croissance hors sol des semis de conifères n'est pas inhibée par les systèmes racinaires qui ont été déformés par les techniques de culture et les techniques de mise en terre. CRÉMIÈRE (1994) rapporte que les principales déformations montrent toutes une légère tendance à réprimer la croissance, mais dont leur importance reste négligeable.

SHEEDY (1996) conclut que le phénomène d'instabilité des plants est un problème marginal sans trop de répercussions à moyen terme. Des arbres stables et vigoureux peuvent avoir des systèmes racinaires déformés, sans conséquences défavorables pour l'arbre (CRÉMIÈRE 1994, SHEEDY 1996). En dépit de quelques preuves indiquant que les malformations aux racines ne sont pas nuisibles au développement des semis, beaucoup de travailleurs forestiers et de chercheurs sont hésitants à renoncer à leurs convictions sur les effets négatifs des malformations aux systèmes racinaires (HAASE *et al.* 1993).

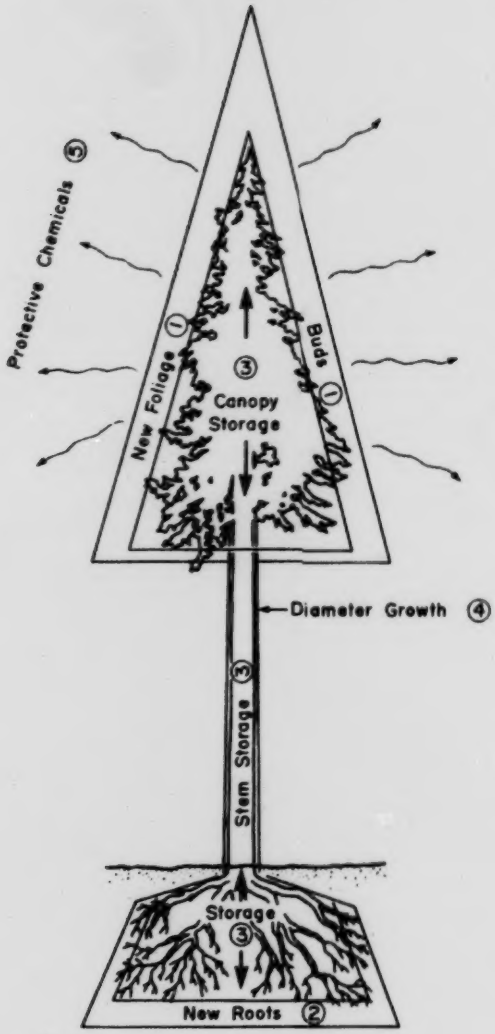
L'instabilité des semis et des arbres peut être due à bien d'autres facteurs que les malformations des racines qui, seuls ou collectivement, affaiblissent la résistance des arbres aux forces externes et les rendent plus vulnérables aux courbures, aux cassures ou chutes (PERSSON 1982). Les effets combinés du choix de l'essence, d'un dessin inapproprié de récipient, de mauvaises techniques de culture en pépinière, d'un mauvais choix de site, d'une faible préparation de sol et de mauvaises techniques de mise en terre créent de très faibles chances de succès de développement des plants (HALTER *et al.* 1993, LINDSTRÖM 1995, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994).

Pour plusieurs conifères, les effets négatifs de la culture en pépinière et les méthodes de mise en terre qui limitent l'efficacité du support mécanique du système racinaire, sont contrés par la production en plantation, de nouvelles racines latérales de premier ordre (adventives). Toutefois, plusieurs Pins n'ont pas cette capacité (BURDETT *et al.* 1986). L'incapacité des Pins à produire des racines adventives rend la forme de leur système racinaire plus sensible aux méthodes de mise en terre (COUTTS *et al.* 1990).

1.5 Caractéristiques des sites de reboisement et facteurs environnementaux

Les caractéristiques des sites de reboisement et les conditions environnementales jouent un rôle prépondérant dans l'établissement d'une plantation. Sur les sites de reboisement, les processus physiologiques des semis nouvellement mis en terre peuvent être altérés lorsque les conditions environnementales sont extrêmes, telles les basses températures et les conditions de sécheresse (GROSSNICKLE et FOLK 1993). Les changements environnementaux qui se produisent après la coupe peuvent modifier de façon très importante la chimie et les flux de l'azote. Le cycle de l'azote est principalement perturbé par la température, le contenu en eau et la composition chimique de la matière organique. Durant la phase d'établissement, les semis nouvellement mis en terre peuvent être soumis à des limitations importantes au niveau de l'absorption de l'eau, de l'azote et du carbone (MARGOLIS et BRAND 1990). Dès qu'un plant est mis en terre, son feuillage est immédiatement sujet à la transpiration. En conséquence, l'établissement de connections fonctionnelles entre les racines et le sol est très important pour la survie initiale et la croissance. De plus, le plant doit également contrôler ses pertes en eau par les stomates durant les périodes de fortes demandes pour éviter la dessiccation ou la mort (MARGOLIS et BRAND 1990). Durant la phase d'établissement, la répartition du carbone entre les différentes parties du plant peut être influencée par les caractéristiques du sol. Le flux du carbone peut être dirigé vers les feuilles, la tige ou les racines. La figure 1 (WARING et SCHLESINGER 1985) présente la hiérarchisation normale de l'allocation du carbone entre les différentes parties du plant. La croissance et la distribution des racines sont sujettes à différentes influences internes et externes. Selon WATSON et HIMELICK (1982), la plus grande influence externe est possiblement exercée par les propriétés physiques et chimiques du sol. La croissance du système racinaire de plusieurs conifères de la forêt boréale devient limitée à des températures inférieures à 8 - 12 degrés Celcius. Parmi les variables environnementales, la basse température du sol est la plus importante en regard de la croissance des conifères (BALISKI *et al.* 1995).

Chaque sol offre aux racines des conditions particulières d'expansion, liées à ses caractéristiques nutritionnelles et à ses propriétés physiques de pénétrabilité (COLIN *et al.* 1995). De plus, chaque essence passe par des stades de développement particuliers, résultats de l'expression de plusieurs phénomènes de croissance, et caractérisés chacun par une morphologie plus ou moins typique. La pénétration horizontale et verticale des racines dépend de la texture du sol (composition et profil) et de la profondeur des horizons (WATSON et HIMELICK 1982). La compaction et les conditions d'humidité du sol inhibent la croissance des racines (GILMAN *et al.* 1987, GRENE 1978a). L'humidité du sol et son aération, qui sont inversement proportionnelles, ont un impact majeur sur la croissance des racines (GILMAN *et al.* 1987, WATSON et HIMELICK 1982). Selon GRENE (1978a), le facteur qui influence le plus la croissance des racines est le niveau d'oxygène du sol. Des problèmes de développement racinaire se rencontrent souvent sur les sols à fine texture qui ont une forte rétention en eau et qui sont par conséquent froids et pauvres en oxygène (LINDSTRÖM 1995, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994, PERSSON 1982). Les malforma-



1- *Buds*	Bourgeons
New Foliage	Nouveau feuillage
2- *New Roots*	Nouvelles racines
3- *Canopy Storage*	Accumulation dans la partie aérienne
Stem Storage	Accumulation dans la tige
... Storage	Accumulation dans les racines
4- *Diameter Growth*	Croissance en diamètre
5- *Protective Chemicals*	Substances chimiques de protection

Extrait de Waring et Schlesinger (1985)

Figure 1.

Hiérarchisation de l'allocation du carbone dans les arbres

tions racinaires sont probablement plus sérieuses dans les sols compacts faiblement aérés (LINDSTRÖM 1978). Comme le mentionne CRÉMIÈRE (1994), l'hydromorphie, liée à un mauvais drainage du terrain, est une des causes de déstabilisation des plants. Un plus grand nombre de racines adventives, une augmentation de la ramification des racines plus profondes et aucun développement de racine principale n'ont été notés dans les sols compactés et dans les sols non compactés à faible teneur en O_2 (GILMAN *et al.* 1987).

Les racines qui se développent dans les sols bien aérés sont longues et de couleur claire, tandis que celles qui se développent à des niveaux insuffisants d'oxygène sont entortillées, plus courtes et de couleur plus foncée avec peu de chevelu. L'aération du sol affecte la distribution des racines en limitant la pénétration en profondeur à des faibles concentrations en oxygène. Les réactions morphologiques à des périodes de faible concentration en oxygène dans le sol comprennent une augmentation de la ramification des racines et la formation de racines adventives (GILMAN *et al.* 1987). Les données des expériences réalisées par FARRISH (1991) indiquent que la concentration de racines fines dans les sols forestiers décroît rapidement en réaction aux conditions défavorables du sol, telles une saturation prolongée en eau et une sécheresse.

1.6 Préparation de terrain et mise en terre des plants

La préparation de terrain a pour but de réduire les débris de coupe pour faciliter la mise en terre des semis, de minimiser les risques de feu, de diminuer la végétation de compétition, de réduire l'incidence des maladies et d'améliorer la structure du sol (GRAHAM *et al.* 1989). Une préparation de terrain adéquate pour la régénération artificielle exige un équilibre entre le maintien des réserves organiques du sol et la réduction des mauvaises herbes. Elle doit aussi créer les conditions optimales pour la croissance des semis, principalement durant la croissance initiale (GRAHAM *et al.* 1989).

La préparation de terrain peut améliorer les conditions de croissance mais aussi créer des risques pour la stabilité des plants (sillons de labours dans le même sens pour toute la plantation, implique le même défaut du système racinaire pour toute la plantation) (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Le système racinaire des semis naturels se développe au niveau du riche environnement situé à l'interface du sol minéral et du sol organique. La morphologie des systèmes racinaires et les techniques de mise en terre favorisent un développement racinaire dans les horizons pauvres et froids du sol minéral (BALISKI *et al.* 1995). Les recommandations pour la mise en terre des plants en Colombie-Britannique font que les semis sont mis en terre dans le sol minéral avec les extrémités des racines « prêtes à croître » placées dans la partie la plus basse et la plus froide du trou de plantation. La croissance racinaire et l'absorption de l'eau sont dépendantes de la température du sol (BALISKI *et al.* 1995).

Les travaux de préparation de terrain, tels le labourage et le buttage augmentent la stabilité des plants en favorisant une augmentation des températures et un ameublissement du sol (LINDSTRÖM 1995). Les expériences réalisées par SUTTON et WELDON (1995) ont démontré que la préparation de sol permet d'augmenter significativement la survie et la croissance de plants d'Épinette blanche. La forme du système racinaire peut être conditionnée par l'environnement du sol mais les techniques de mise en terre et la façon dont les racines se développent peuvent aussi influencer (COUTTS *et al.* 1990). ARNOLD et WELSH (1995) rapportent que les surfaces vitrifiées ou les différences de densité à l'interface des trous de plantation restreignent la croissance racinaire à l'intérieur du trou de plantation. Toutefois, dans une étude réalisée avec le Chêne de Virginie (*Quercus virginiana* Mill.), les mêmes auteurs observent que la croissance des racines hors de la carotte n'a pas été restreinte par l'interface substrat – sol ou par l'interface trou de plantation – sol peu importe le type de sol et la configuration du trou de plantation.

La compaction influence significativement la répartition des racines. Dans les sols compactés, les racines se développent plus dans la partie supérieure (GILMAN *et al.* 1987). Le substrat de culture utilisé pour la production de semis en récipients sèche rapidement après la plantation. En conséquence, la régénération des racines hors de la motte dans le remblai environnant est critique pour la phase d'établissement des arbres (ARNOLD et WELSH 1995). Ce processus peut être empêché par le contraste entre une faible densité du substrat de culture et une densité plus élevée de plusieurs sols. Les travaux de GIROUARD (1995) et SHEEDY (1993) démontrent que la stabilité de l'Épinette noire et du Pin gris était supérieure en forêts privées par rapport à la forêt publique, possiblement en raison d'une meilleure préparation de sol et d'un meilleur drainage. Une faible teneur en oxygène du sol peut entraîner une réduction de croissance des parties aérienne et racinaire (KOSLOWSKI 1986).

Les utilisateurs de semis doivent également être conscients qu'une mauvaise manutention des stocks durant le transport, des mauvaises méthodes de mise en terre et le côté imprévisible des conditions des sites de reboisement vont influencer les prévisions des tests d'évaluation du potentiel des semis (GROSSNICKLE et FOLK 1993).

Chapitre deux

Matériel et méthodes

Des semis d'Épinette noire, d'Épinette blanche, de Bouleau jaune et de Chêne rouge ont été produits en pépinière en 1993 et 1994 et mis en terre dans sept plantations expérimentales en 1994 et 1995. Les informations relatives à la culture en pépinière sont présentées dans GINGRAS et RICHARD (1999).

2.1 Biencourt P93.1 Épinette noire

Des semis d'Épinette noire ont été cultivés en serre en 1993 à la pépinière de Saint-Modeste (Québec) dans les récipients *15-320* (témoin) et *1-360A* (IPL inc., Saint-Damien [Québec]) à 1,0 et 2,0 cm d'espacement entre les cavités (Annexe A). Le récipient *15-320* compte 15 cavités de 320 cm^3 et le *1-360A* a une seule cavité à parois ajourées de 360 cm^3 conçue pour s'attacher aux autres cavités à deux espacements différents. Au printemps 1994, les plants ont été mis en terre dans la réserve faunique de Rimouski (N 47° 57′ 30,3″, W 68° 24′ 23,7″) près du village de Biencourt. L'annexe B présente le schéma de localisation de cette plantation ainsi que celui des six autres plantations expérimentales. Les caractéristiques du site de reboisement et les travaux de préparation du terrain sont décrits à l'annexe C. La figure 2 présente une illustration du site d'expérimentation au moment de la mise en terre des plants. Le dispositif est en blocs (8) aléatoires complets (Annexe D). Chaque unité expérimentale compte 25 plants à un espacement de 2,5 m entre les sillons et 3,0 m le long des sillons. Des plants supplémentaires (25 par unité expérimentale) ont été mis en terre le long des sillons pour les récoltes destinées aux analyses des systèmes racinaires. La plantation comptait 1200 plants (400 du traitement) au moment de son installation. Depuis la mise en place de cette plantation, aucun dégagement (chimique ou mécanique) n'a été nécessaire. Les inventaires morphologiques réalisés à chaque automne ont toutefois contribué à dégager quelque peu les plants de la végétation de compétition.

Les mesures ont été effectuées au printemps 1994 lors de la mise en terre des plants puis à chaque automne de 1994 à 1998 (cinq ans). Des relevés à l'âge de huit ans (2001) et dix ans (2003) sont normalement prévus. À chaque inventaire, le pourcentage de survie, la hauteur totale (centimètre) et le diamètre au collet (millimètre) de tous les plants (200) sont mesurés pour chaque traitement. De plus, à la cinquième année, des analyses de la concentration en minéraux (azote [N], phosphore [P], potassium [K], calcium [Ca], magnésium [Mg] et manganèse [Mn]) dans les tissus ont été réalisées pour les traitements *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm. Des sections de branche de 10 cm de longueur ont été récoltées sur dix pousses annuelles (sauf la pousse terminale) de plants différents dans le tiers supérieur de l'arbre pour chaque unité expérimentale. Les tissus ont été ensuite séchés à l'étuve à 60 °C pendant 48 heures et, par la suite, réduits (0,5 mm) à l'aide d'un broyeur Tecator (modèle *Cyclotec 1093*). Les éléments minéraux ont été extraits à l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré et au peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) : traitement à 370 degrés Celsius pendant une heure sur un appareil à digestion (modèle *1016, digestor system 40*). L'azote a été quantifié à l'aide d'un colorimètre à flot continu (Lachat Instruments, Milwaukee, WI, USA, modèle *QuikChem 8000*) et les autres éléments sur un spectrophotomètre d'émission atomique au plasma (Thermo Jarrel ASH, modèle *ICAP 9000* ou *ICAP 61E*). Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles (Forêt Québec). Les résultats de ces analyses sont exprimés en g/kg et présentés en pourcentage dans les tableaux de résultats. Le contrôle et l'assurance de la qualité des travaux analytiques ont été réalisés en utilisant différents matériaux de références, dont *Apple leaves n°1515* et *Peach leaves n°1547*, lesquels proviennent du *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. Les méthodes d'analyse de ces éléments minéraux sont décrites en détail par WALINGA *et al.* (1995).

À l'été 1998, des analyses de développement racinaire ont été effectuées sur 16 plants pour les traitements *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm. Les plants ont été extraits du sol et les observations ont été réalisées en laboratoire. Lors de l'extraction,

les racines ont été sectionnées à 30 cm de la tige jusqu'à une profondeur de 30 cm. En plus de la hauteur (cm) et du diamètre au collet (mm), les observations qualitatives et quantitatives suivantes ont été réalisées sur les plants : formation de racines adventives (1 ou 0), distribution des racines adventives sur 360° (1 à 5), distribution des racines (autres que les adventives) sur 360° (1 à 5), distribution verticale des racines (autres que les adventives) (1 à 5), enroulement des racines (5 à 1), persistance de la carotte initiale (5 à 1), enchevêtrement des racines (5 à 1), déformation à la base de la carotte (5 à 1) et écoulement de résine ou de sève (1 et 0), nombre de racines adventives, diamètre des racines adventives (mm), masse anhydre des racines adventives (mg), nombre de racines qui émergent de la carotte, masse des racines qui émergent de la carotte (mg), la masse de la carotte initiale (mg) et la masse totale des racines (mg). L'annexe E présente la feuille de prise de données pour l'analyse des systèmes racinaires.

Les analyses de la variance ont été effectuées pour toutes les variables quantitatives à l'exception des variables nombre de racines adventives et masse des racines adventives. Le modèle statistique utilisé est le suivant (DEBLOIS 1999) :

$$Y_{ik} = \mu + \tau_i + \beta_j + \tau\beta_{ij} + \varepsilon_{ik}$$

où Y_{ik} = valeur obtenue pour le plant k cultivé dans le récipient j situé dans le bloc i

μ = moyenne générale

τ_i = effet du bloc i

β_j = effet du récipient j

$\tau\beta_{ij}$ = interaction entre le bloc i et le récipient j

ε_{ik} = erreur d'échantillonnage

Les analyses de variance ont été réalisées à l'aide de la procédure *MIXED* de SAS (SAS Institute inc. [1999], Cary, NC, USA). Les tests de comparaison de moyennes ont été effectués à l'aide du test de Tukey lorsque des différences significatives étaient observées. Pour chacune des analyses, l'hypothèse de normalité a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilks alors que l'homogénéité des variances a été vérifiée de façon graphique. Pour les variables qualitatives ordinales, une analyse de tableaux de fréquence a été réalisée à l'aide du test de Kruskal-Wallis modifié. C'est à partir de ce test qu'ont également été analysés le nombre de racines adventives et la masse des racines adventives en raison du peu de valeurs différentes obtenues ou d'une grande proportion de valeurs nulles. Finalement, pour les variables qualitatives non ordinales (formation de racines adventives et écoulement de résine), le test exact de Fisher a été utilisé.

Des plants naturels (17) de dimensions comparables à ceux du dispositif expérimental ont été récoltés (Forêt Montmorency, 99/07/23) et analysés pour mieux connaître l'architecture des systèmes racinaires des plants régénérés naturellement. Les paramètres suivants ont été mesurés : hauteur (cm), diamètre au collet (mm), concentrations en minéraux dans les aiguilles (N, P, K, Ca, Mg et Mn), distribution des racines sur 360°, distribution verticale des racines, enchevêtrement des racines, écoulement de résine ou de sève, estimation de l'âge du plant et nombre de racines latérales de premier ordre (Annexe E). Les méthodes de récolte et d'analyses sont exactement les mêmes que celles décrites pour le dispositif expérimental P93.1 Épinette noire. Aucune analyse statistique n'a toutefois été réalisée. Tous les plants ont été mesurés pour les variables morphologiques. Les analyses de la concentration en minéraux dans les tissus ont été réalisées à partir de trois échantillons composites.

2.2 Biencourt P93.1 Épinette blanche

Les expériences (dispositifs distincts) avec les semis d'Épinette blanche en pépinière et dans la plantation ont été réalisées simultanément, dans les mêmes conditions et selon les mêmes méthodes que celles utilisées pour l'Épinette noire présentées à la section précédente. Les annexes A, B, C, D et E et la figure 2 présentent les précisions additionnelles pour l'Épinette blanche. La totalité des relevés effectués et l'ensemble des méthodes d'analyse statistique et de laboratoire sont exactement les mêmes.

Des plants naturels d'Épinette blanche (16) ont également été récoltés (Réserve faunique de Rimouski, 99/10/01) et analysés selon la même méthode utilisée pour l'Épinette noire (Section 2.1).

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski – site forestier (N 47° 57' 30,3", W 68° 24' 23,7");
- Année de la coupe : 1991 - avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993);
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,5 m x 3,0 m (avec des plants supplémentaires intercalés à 1,5 m le long des sillons).

Figure 2.

Sites expérimentaux P93.1 Épinette noire et P93.1 Épinette blanche au moment de la mise en terre des semis au printemps 1994

2.3 Biencourt P94.1 Épinette blanche

À l'hiver 1994, des semis d'Épinette blanche ont été cultivés en serre à la pépinière forestière de Saint-Modeste (Québec) dans les récipients *25-350A* et *1-350A* (IPL inc., Saint-Damien [Québec]) à 1,5 cm d'espacement (Annexe A). Les plantations établies en 1995 (P94.1 et P94.2) ne comportent pas de récipient témoin à parois pleines (ex. : *15-320*) comme les dispositifs de 1994 (P93.1). En effet, les résultats obtenus avec les tests de capacité de croissance racinaire à la fin de la culture en pépinière laissaient entrevoir un potentiel plus élevé en plantation pour les récipients à parois ajourées. Le *25-350A* a été dessiné à partir des résultats de recherche en pépinière obtenus avec le récipient *1-360A* (GINGRAS 1993, GINGRAS et RICHARD 1999) et il est maintenant utilisé à grande échelle. La seule différence dans le dessin des cavités est le défilement constant jusqu'à la base des côtés des cavités du *25-350A*. Le rétrécissement à la base du *1-360A* a été éliminé de manière à diminuer les déformations des racines au bas de la cavité. Le récipient *1-350A* à parois ajourées présente un dessin amélioré des angles et des ouvertures dans les parois des cavités. Il peut s'attacher à 1,5 et 3,0 cm d'espacement entre chaque cavité. Les plants ont été mis en terre au printemps 1995 dans un dispositif expérimental situé à moins d'un kilomètre du site P93.1 (sections 2.1 et 2.2). Les coordonnées au centre des plantations P94.1 et P94.2 (Section 2.4) sont : N 47° 57' 41,9", W 68° 24' 35,4". La localisation de la plantation ainsi que les caractéristiques du site de reboisement sont présentées aux annexes B et C. Une illustration du dispositif au moment de la mise en terre des plants est présentée à la figure 3. Le dispositif expérimental en plantation est en blocs (12) aléatoires complets (Annexe F). Chaque unité expérimentale compte 30 plants pour un total de 360 plants du traitement. Les semis ont été mis en terre à 2,0 m x 2,0 m de distance. Contrairement aux plantations présentées aux sections 2.1 et 2.2, aucun plant intercalaire le long des lignes de plantation n'a été ajouté. Bien que la compétition soit plus intense que pour les deux plantations précédentes, aucun dégagement n'a été effectué.

Des inventaires ont été réalisés au printemps 1995 et à chaque automne des cinq premières années (1995 à 1999). À l'âge de huit ans et dix ans, des relevés supplémentaires seront normalement effectués. Le pourcentage de survie, la hauteur totale et le diamètre au collet ont été mesurés à chaque récolte. À l'inventaire de la cinquième année, des analyses de concentration en minéraux (N, P, K, Ca, Mg et Mn) ont été effectuées pour les deux traitements. La méthode de récolte sur le terrain et les techniques d'analyse en laboratoire sont les mêmes que celles décrites à la section 2.1.

Des analyses de développement racinaire ont été effectuées sur 24 plants par traitement à l'été 1999. Les plants ont été extraits du sol (racines sectionnées à 30 cm de la tige et à 30 cm de profondeur) et analysés en laboratoire. Les variables évaluées lors de ces inventaires sont les mêmes que celles présentées pour l'Épinette noire (Section 2.1).

Le modèle statistique général suivant a été utilisé pour les analyses de variance sur les variables quantitatives (AUGER 2000, SAVARD 1999) :

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_k + \tau\beta_{ij} + \beta\delta_{jk} + \tau\delta_{ik} + \tau\beta\delta_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

où Y_{ijkl} = valeur observée sur le plant l, cultivé dans le récipient de type i, dans le bloc j, au temps k

μ = moyenne générale

τ_i = effet du type de récipients i (effet fixe)

β_j = effet du bloc j (effet aléatoire)

δ_k = effet du temps k (effet fixe)

$\tau\beta_{ij}$ = effet de l'interaction entre le récipient i et le bloc j (effet aléatoire)

$\beta\delta_{jk}$ = effet de l'interaction entre le bloc j et le temps k (effet aléatoire)

$\tau\delta_{ik}$ = effet de l'interaction entre le récipient i et le temps k (effet fixe)

$\tau\beta\delta_{ijk}$ = effet de l'interaction entre le récipient i, le bloc j et le temps k (effet aléatoire)

ε_{ijkl} = erreur associée à la valeur Y_{ijkl}

Les analyses de variance ont été réalisées à l'aide de la procédure *MIXED* de SAS. Pour chacune des analyses de variance, l'hypothèse de normalité des erreurs a été validée à l'aide du test de Shapiro-Wilks et l'hypothèse d'homogénéité des variances a été validée graphiquement. Le test de Tukey a été utilisé pour les comparaisons multiples. Les variables quantitatives ordinales ont été analysées à l'aide du test de Kruskal-Wallis modifié tandis que pour les variables qualitatives non ordinales, le test exact de Fisher a été utilisé.

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski - site forestier (N 47° 57' 41,9", W 68° 24' 35,4");
- Année de la coupe : 1991 – avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993). Le scarificateur a dû être utilisé en 1995 pour dégager les lignes de plantation;
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,0 m x 2,0 m.

Figure 3.

Sites expérimentaux P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche au moment de la mise en terre des semis au printemps 1995

2.4 Biencourt P94.2 Épinette blanche

Des semis d'Épinette blanche ont été produits dans le récipient *1-350A* à 1,5 cm et à 3,0 cm d'espacement entre chaque cavité (Annexe A) dans les mêmes conditions que les semis d'Épinette blanche de la section 2.3. Ce dispositif, complémentaire au précédent, servait principalement à évaluer l'effet de la densité de culture sur le gabarit des plants en pépinière. Au printemps 1995, les semis ont été mis en terre dans une plantation comparative adjacente à celle de la section précédente (P94.1 Épinette blanche – Annexe B). Les caractéristiques des sites de reboisement sont présentées à l'annexe C et à la figure 3. Le type de dispositif expérimental est exactement le même que celui de la section 2.3 (Annexe F).

Les relevés morphologiques ainsi que l'analyse des concentrations en minéraux dans les tissus ont été réalisés en même temps que ceux du dispositif avec les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm (Section 2.3). Contrairement au dispositif précédent, aucune analyse de développement racinaire n'a été effectuée sur ces plants.

Les analyses statistiques ont été réalisées selon les mêmes méthodes que celles présentées à la section 2.3.

2.5 Saint-Germain-de-Grantham P94.3 Bouleau jaune

Des semis de Bouleau jaune ont été cultivés en 1994 à la pépinière forestière de Berthierville (Québec) dans les récipients *45-340* (témoin), *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm d'espacement (Annexe A). Les plants ont été mis en terre au printemps 1994 dans un site agricole abandonné depuis deux à trois ans à Saint-Germain-de-Grantham (N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05") près de Drummondville (Québec). Les annexes B et C présentent la localisation de la plantation, les caractéristiques du site de reboisement et une description des travaux de préparation de terrain. La figure 4 présente une photographie de l'aire expérimentale au printemps 1995. Le dispositif est en blocs aléatoires (8) complets. Chaque unité expérimentale compte 28 plants pour un total de 224 plants du traitement (Annexe G). Des bandes de paillis de polyéthylène noir de 1,1 m de largeur (Engrais chimiques Lévis) ont été étendues et fixées sur le sol à une distance (centre à centre) de 3,5 m et les semis ont été mis en terre à 2,0 m le long des paillis dans des ouvertures en croix. Une collerette a été ajoutée à la base de chaque plant et fixée au sol avec des crampes en U. Aucun plant intercalaire n'a été ajouté pour les analyses de systèmes racinaires non prévues initialement. Des travaux de dégagement (fauchage du foin) entre les bandes de paillis ont été réalisés deux à trois fois l'an.

La base des plants (20 à 25 cm) a été traitée au répulsif *Rodent Repellent* (Wilbur-Ellis) et du *Rodent Bait* (United Agri Products) a été déposé dans des tubes de 20 cm de longueur et de 3,8 cm de diamètre répartis dans la plantation. Dès que les plants ont atteint des dimensions suffisantes, des spirales de 75 cm de hauteur (Timm Enterprises Ltd) ont été installées à la base des plants. Ces dernières ont été retirées entre la quatrième et la sixième année de plantation. De plus, durant les trois premières années, du répulsif à cerf *Deer Away* (Intagra) a été appliqué sur les tiges. Finalement, à chaque fin d'automne, du *Ramik Brown* (Hacco) a été déposé en périphérie de la plantation afin de tenir les rongeurs à l'extérieur du site expérimental.

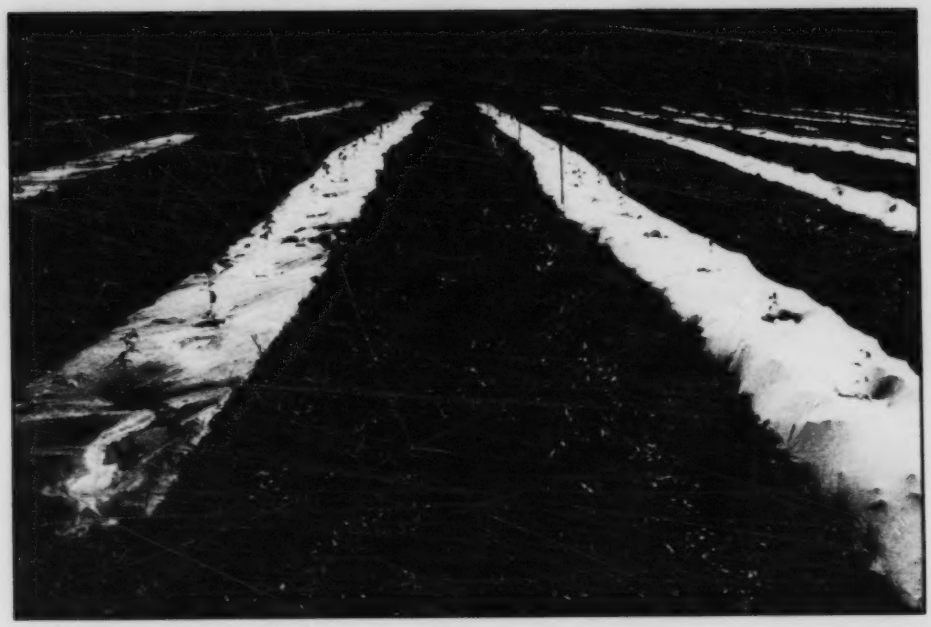
À quelques reprises, les arbres ont été taillés de manière à élaguer les branches basses et à corriger les défauts de forme.

Comme pour les plantations résineuses (Sections précédentes), des relevés morphologiques (hauteur, diamètre au collet et pourcentage de survie) sur tous les arbres ont été réalisés à la mise en terre des plants ainsi qu'à chaque automne durant les cinq premières années. Des relevés additionnels seront normalement réalisés à la huitième année (2002) et à la dixième année (2004). Des analyses de la concentration en minéraux dans les tissus (N, P, K, Ca, Mg et Mn) ont été effectuées à la fin de l'été de la cinquième saison. Dix sections de 10 cm de pousses annuelles ont été prélevées sur des arbres différents dans le tiers supérieur des plants pour chaque unité expérimentale. Les mêmes techniques d'analyse que celles décrites à la section 2.1 ont été utilisées.

Des analyses de développement racinaire ont été réalisées sur 16 plants pour les trois traitements à l'été 1999. Comme pour les conifères, les plants ont été extraits (racines coupées à 30 cm de la tige jusqu'à 30 cm de profondeur) et analysés au laboratoire. L'annexe E présente l'ensemble des paramètres qui ont été évalués sur les plants récoltés.

Les analyses de variance ont été réalisées sur les variables quantitatives à l'aide du modèle statistique général suivant :

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_{k} + \tau\beta_{ij} + \beta\delta_{jk} + \tau\delta_{ik} + \tau\beta\delta_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$



- Plantations à St-Germain-de-Grantham (N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05");
- Peuplement d'origine : terre agricole abandonnée depuis 2 à 3 ans;
- Zone écologique : érablière à Tilleul;
- Préparation de terrain : labourage et hersage agricole avec pose de paillis en longueur;
- Outil de mise en terre : pelle;
- Densité de reboisement : 3,5 m x 2,0 m;
- Protection annuelle contre les petits rongeurs et les chevreuils.

Figure 4.

Sites expérimentaux P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge au moment de la mise en terre des semis au printemps 1995

La procédure *MIXED* du logiciel SAS a été utilisée pour les analyses de la variance et le test de Tukey pour les comparaisons multiples lorsque des différences significatives étaient observées. Le test de Kruskal-Wallis modifié a été utilisé pour les variables qualitatives ordinales tandis que les variables qualitatives non ordinales ont été traitées à l'aide du test exact de Fisher. L'hypothèse de normalité des erreurs a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilks et l'hypothèse d'homogénéité des variances a été validée graphiquement.

Des plants naturels (16) de Bouleau jaune ont été récoltés (Chesterville, 99/07/07) et analysés selon la même méthode que celle présentée à la section 2.1. Les paramètres évalués sont présentés à l'annexe E.

2.6 Saint-Germain-de-Grantham P94.3 Chêne rouge

Des semis de Chêne rouge ont été produits à la pépinière de Berthierville (Québec) dans des conditions semblables de culture que les semis de Bouleau jaune (Section 2.5). Les semis ont été cultivés dans les récipients *28-340* (témoin), *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm d'espacement (Annexe A). Les plants ont été mis en terre au printemps 1995 au même endroit que le Bouleau jaune et dans des conditions identiques selon un dispositif expérimental semblable (Annexes B, C et G et Figure 4). Les travaux de dégagement, de protection des plants contre les rongeurs et de taille des arbres sont identiques à ceux du dispositif avec le Bouleau jaune.

Les mêmes analyses morphologiques, physiologiques et de développement racinaire ont été effectuées. Comme pour le Bouleau jaune, 16 plants de Chêne rouge régénérés naturellement ont été récoltés (Côte de la Miche, Beaupré, 99/06/29) et analysés pour la caractérisation de l'architecture de leurs racines (Annexe E).

Les analyses statistiques ont été réalisées selon le modèle général présenté à la section 2.3 en utilisant des tests identiques.

2.7 Saint-Germain-de-Grantham P94.4 Chêne rouge

Des semis de Chêne rouge ont été cultivés dans des récipients (Annexe A) de fort volume (*12-1000* [témoin] et *1-1050A*) à la pépinière de Berthierville dans des conditions identiques à celles des sections 2.5 et 2.6. L'utilisation de récipients de plus fort volume a été retenue pour évaluer l'effet du volume du récipient sur la dimension des plants et l'architecture des racines. Les plants ont également été mis en terre à Saint-Germain-de-Grantham sur le même site expérimental que celui des plantations de Bouleau jaune (Section 2.5) et de Chêne rouge (Section 2.6) (Annexes B et C et G et Figure 4) et les traitements d'entretien, de protection et de taille des plants ont été semblables. Le dispositif expérimental est en blocs (12) aléatoires complets et chaque unité expérimentale compte 20 plants pour un total de 240 plants du traitement. Les mêmes espacements (3,5 m x 2,0 m) ont été utilisés lors de la mise en terre des semis.

Les mêmes relevés (morphologiques, concentration en minéraux dans les tissus et analyse des racines) que ceux réalisés pour le Bouleau jaune et le Chêne rouge ont été effectués selon une méthode identique de récolte et suivant les mêmes techniques d'analyse en laboratoire.

Le modèle général d'analyse statistique ainsi que les tests présentés à la section 2.3 ont été utilisés.

Chapitre trois

Résultats des plantations résineuses

3.1 Taux de survie et croissance

3.1.1 P93.1 Épinette noire

Cinq ans après la mise en terre, le taux de survie des plants d'Épinette noire est semblable (p=0,1005) pour les trois traitements (*15-320* [97,5 %], *1-360A* à 1,5 cm [94,5 %] et *1-360A* à 2,0 cm [97,5 %]). Le même constat peut être émis pour les quatre premières années (résultats non présentés). Des différences (p=0,0430) sont observées entre les traitements à la cinquième année pour la hauteur totale (Figure 5). Les plants produits dans le récipient *1-360A* à 1,0 cm ont une hauteur supérieure (157 cm) à ceux cultivés dans le récipient *1-360A* à 2,0 cm (148 cm). La hauteur des plants cultivés dans le récipient témoin *15-320* (151 cm) ne présente pas de différence significative avec celle des deux autres récipients. Les différences dans les accroissements en hauteur ont commencé en 1997 pour se poursuivre en 1998. Durant ces deux saisons, des différences significatives (p=0,0364 [1998]) sont observées entre les traitements *1-360A* à 1,0 cm et *1-360A* à 2,0 cm. Au cours des deux dernières saisons, les accroissements pour les trois traitements se situent entre 31 et 35 cm de hauteur.

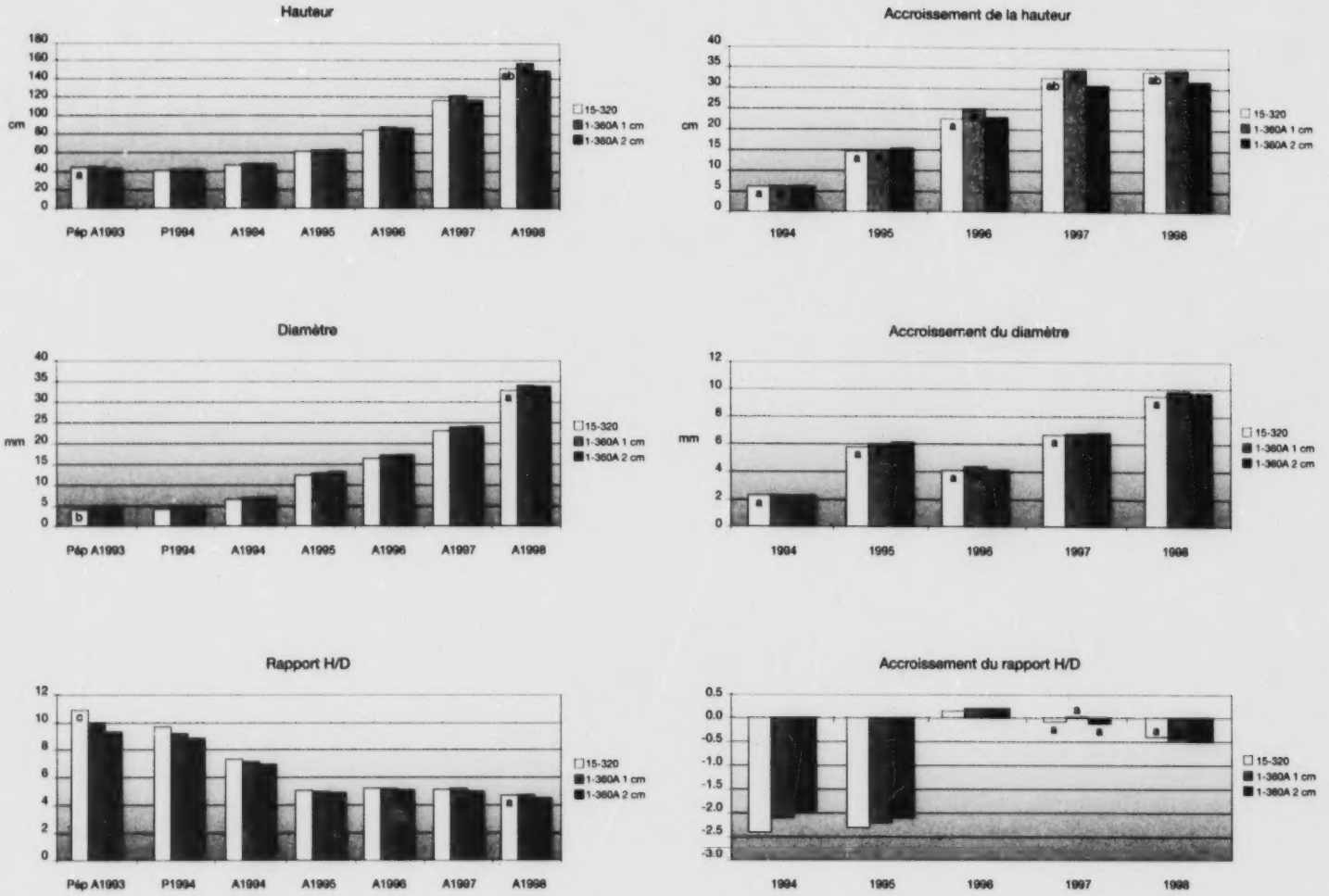
À l'automne 1998, le diamètre au collet des plants des trois traitements est semblable (p=0,4653) : *15-320* (32,8 mm), *1-360A* à 1,0 cm (34,0 mm) et *1-360A* à 2,0 cm (33,8 mm). Une légère correction sur le diamètre au collet s'est effectuée graduellement au cours des cinq années en plantation pour le traitement *15-320* puisque, à l'inventaire de fin de culture en pépinière (automne 1993), le diamètre au collet des plants cultivés dans le *15-320* était inférieur à celui des deux autres traitements (Figure 5). Les accroissements en diamètre sont semblables (p=0,7349) à la cinquième année (de 9,5 à 9,8 mm) ainsi que durant les quatre premières saisons. Le rapport hauteur/diamètre (H/D) s'est stabilisé au fil des saisons pour être comparable (p=0,0906) pour les trois traitements à l'automne 1998 (*15-320* [4,7], *1-360A* à 1,0 cm [4,7] et *1-360A* à 2,0 cm [4,5]). Durant les saisons 1994 et 1995, le rapport H/D a subi une décroissance importante pour devenir constant (≈ 5,0) à partir de 1996 (Figure 5).

Même si aucun dégagement n'a été effectué sur le site expérimental, les plants d'Épinette noire ont réussi dans l'ensemble à passer à travers de la végétation de compétition. La figure 6 présente un plant d'Épinette noire à la cinquième année de plantation. Les différences en intensité de la végétation de compétition observées entre le bas et le haut de la plantation sont de même ordre que celles notées lors des inventaires précédents (Gingras et Richard 1999). Le dégagement nécessaire à la prise des mesures morphologiques a certainement aidé les plants dans les zones à compétition plus forte.

3.1.2 P93.1 Épinette blanche

À leur cinquième saison dans la plantation, les plants d'Épinette blanche produits dans les récipients *15-320*, *1-360A* à 1,0 cm et *1-360A* à 2,0 cm ont un taux de survie similaire (p=0,3980) de 97,0 %, 98,5 % et 96,0 % respectivement. Au cours des quatre premières années en plantation, aucune différence significative sur les taux de survie n'avait été observée entre les traitements (résultats non présentés). Les plants d'Épinette blanche présentent une hauteur semblable (p=0,7751) pour les traitements *15-320* (118 cm), *1-360A* à 1,0 cm (117 cm) et *1-360A* à 2,0 cm (121 cm) à la fin de la cinquième année de plantation (Figure 7). La similitude de hauteur entre les trois traitements s'est maintenue tout au long des saisons de croissance. Les accroissements en hauteur sont semblables (p=0,8077) et varient entre 22 et 23 cm à la cinquième année dans la plantation. Les augmentations les plus importantes ont été observées en 1997 et 1998.

À la fin de la cinquième saison, le diamètre au collet ne présente aucune différence significative (p=0,0946) entre les trois traitements (*15-320* [27,9 mm], *1-360A* à 1,0 cm [29,1 mm] et *1-360A* à 2,0 cm [30,6 mm]). Un ajustement s'est effectué au cours des cinq années, car à la sortie de la pépinière, des différences étaient notées entre les trois traitements (Figure 7). Les accroissements en diamètre à l'automne 1998 sont comparables (p=0,2471) et varient de 6,9 à 7,8 mm.



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 5.

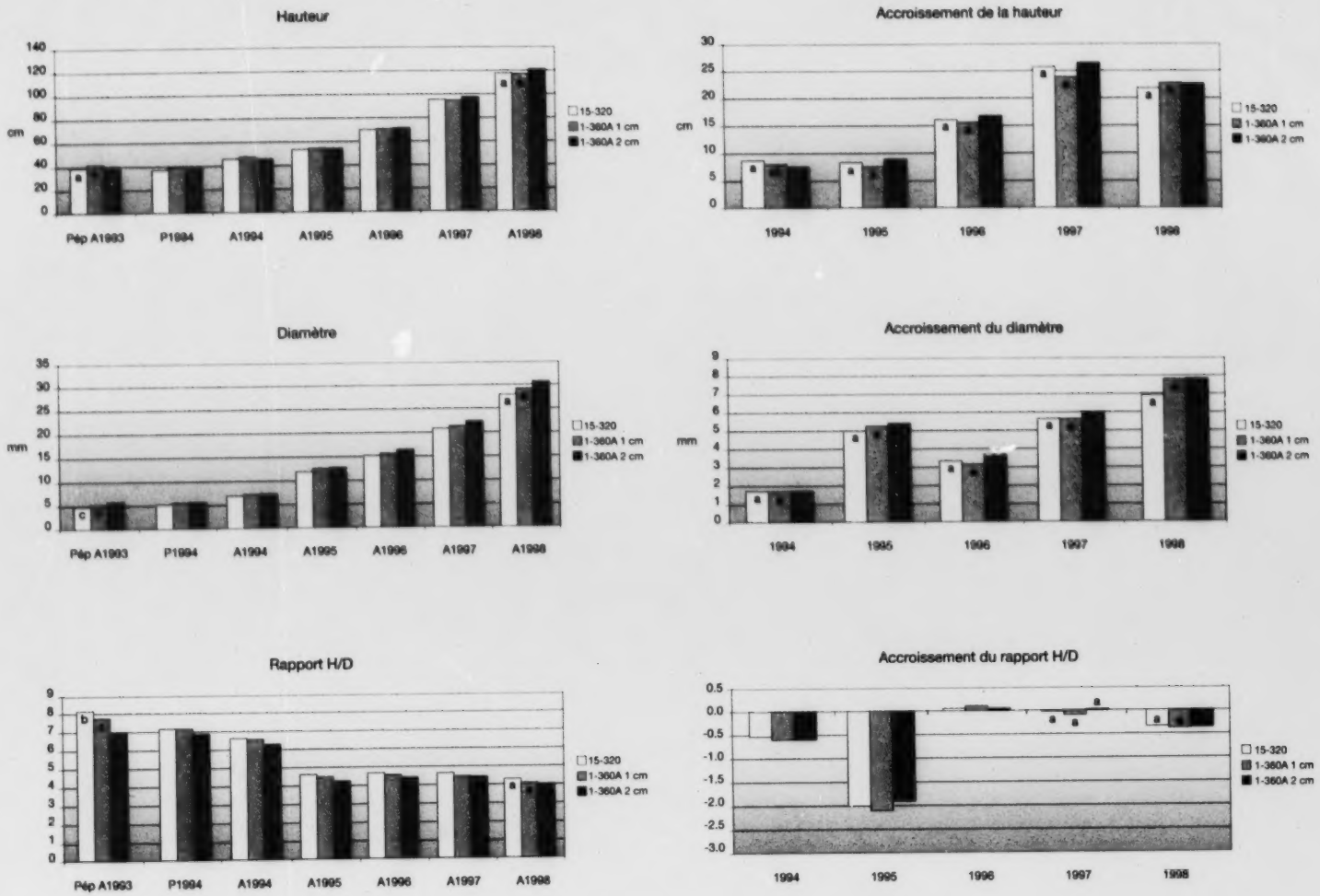
Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1998) - dispositif P93.1 Épinette noire

On peut noter sur cette figure les brûlures à certaines pousses terminales imputables à un gel tardif au printemps 1998

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski – site forestier (N 47° 57' 30,3", W 68° 24' 23,7");
- Année de la coupe : 1991 - avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993);
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,5 m x 3,0 m (avec des plants supplémentaires intercalés à 1,5 m le long des sillons).

Figure 6.

Plant d'Épinette noire (dispositif P93.1 – récipient *15-320*) à la cinquième année (1998) de plantation



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 7.

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1998) - dispositif P93.1 Épinette blanche

Le rapport H/D est semblable (p=0,1130) entre les trois traitements à l'automne 1998 (*15-320* [4,3], *1-360A* à 1,0 cm [4,1] et *1-360A* à 2,0 cm [4,0]). Le rapport H/D s'est stabilisé à une valeur d'environ 4,5 en 1995. La plus importante correction est survenue en 1995 (≈ -2,0) et depuis 1996, les accroissements de H/D sont minimes et comparables (p=0,8199 [1998]).

Les plants d'Épinette blanche ont réussi à se frayer un chemin à travers une végétation de compétition moyennement forte, faible dans le bas et élevée dans le haut de la plantation (Figure 8). Comme mentionné pour l'Épinette noire (Section précédente), le dégagement nécessaire à la mesure adéquate du diamètre au collet des plants a certainement aidé.

3.1.3 P94.1 Épinette blanche

Les pourcentages de survie des récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm sont semblables (p=0,6524) à 90,7 % et 91,7 % à l'automne 1999. La baisse progressive (≈ 3,0 % par année) des taux de survie est survenue au cours des saisons 1997, 1998 et 1999 (résultats non présentés). La mortalité est principalement attribuable à l'Armillaire (Ministère des Ressources naturelles, Direction de la conservation des forêts). À la fin de la cinquième année, la hauteur des plants pour les deux traitements est identique (p=0,8345) à 117 cm (Figure 9) et est semblable à celle des Épinettes blanches du dispositif précédent (Section 2.1.2). Des accroissements similaires (p=0,4377) d'environ 25 cm de hauteur ont été observés en 1999.

Le diamètre au collet à l'automne 1999 est identique (p=0,9445) à 24,5 mm pour les deux traitements (Figure 9). À chaque inventaire, on peut observer la même similarité entre les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm d'espacement. La même observation (p=0,9827) peut être faite avec les accroissements en diamètre qui atteignent 5,3 mm à la fin de la cinquième saison. Le rapport H/D subit une légère diminution pour se stabiliser, à partir de 1998 (p=0,8757 [1999]), à une valeur moyenne de 4,9. La diminution du rapport H/D s'est faite de façon plus progressive que dans le cas du dispositif précédent sur l'Épinette blanche (P93.1). Aucune différence (p=0,4842) n'est observée pour l'accroissement du rapport H/D à la cinquième année.

La végétation de compétition est toutefois plus dense et plus agressive que celle des deux plantations établies en 1994 et elle est uniforme sur tout le site (Figure 10). Lors du mesurage des plants à l'automne, la végétation de compétition a été perturbée au minimum puisqu'il devait initialement y avoir des mesures sur la quantité de lumière reçue par les plants.

3.1.4 P94.2 Épinette blanche

Cinq ans après la mise en terre, les pourcentages de survie des deux traitements *1-350A* à 1,5 cm (89,4 %) et *1-350A* à 3,0 cm (92,0 %) sont similaires (p=0,2231). Comme pour le dispositif précédent, les taux de survie étaient de 100 % durant les deux premières années. La diminution s'est échelonnée de façon progressive sur les trois années subséquentes. Comme pour le dispositif P94.1 Épinette blanche, l'Armillaire est responsable en grande partie de la mortalité des plants. La hauteur totale atteinte est semblable (p=0,6432) pour les deux traitements (*1-350A* à 1,5 cm [115 cm] et *1-350A* à 3,0 cm [114 cm]) cinq saisons après la mise en terre (Figure 11). Aucune différence significative (p=0,1423) pour l'accroissement de la hauteur n'est observée entre les traitements à la cinquième année. Les accroissements les plus élevés en cinq ans varient entre 24 cm et 26 cm.

À l'automne 1999, le diamètre au collet est similaire (p=0,7043) pour les deux traitements (*1-350A* à 1,5 cm [22,6 mm] et *1-350A* à 3,0 cm [22,3 mm]). Les accroissements en diamètre ont augmenté constamment entre les années 1995 et 1998 pour redescendre en 1999 (Figure 11). Durant cette période, des différences significatives dans les accroissements sont observées seulement en 1996 (en 1999, p=0,1961). De 1995 à 1999, le rapport H/D a légèrement diminué pour se stabiliser aux alentours de 5,2 (p=0,9992) pour les deux traitements. Des différences significatives (p=0,0490) dans l'accroissement du rapport H/D sont mesurées entre les deux types de récipients à l'automne 1999.

La densité de la végétation de compétition (Figure 12) est également élevée sur ce site et elle est identique à ce qui est mentionné à la section précédente pour le dispositif P94.1 Épinette blanche.

3.2 Concentrations en minéraux dans les tissus

3.2.1 P93.1 Épinette noire

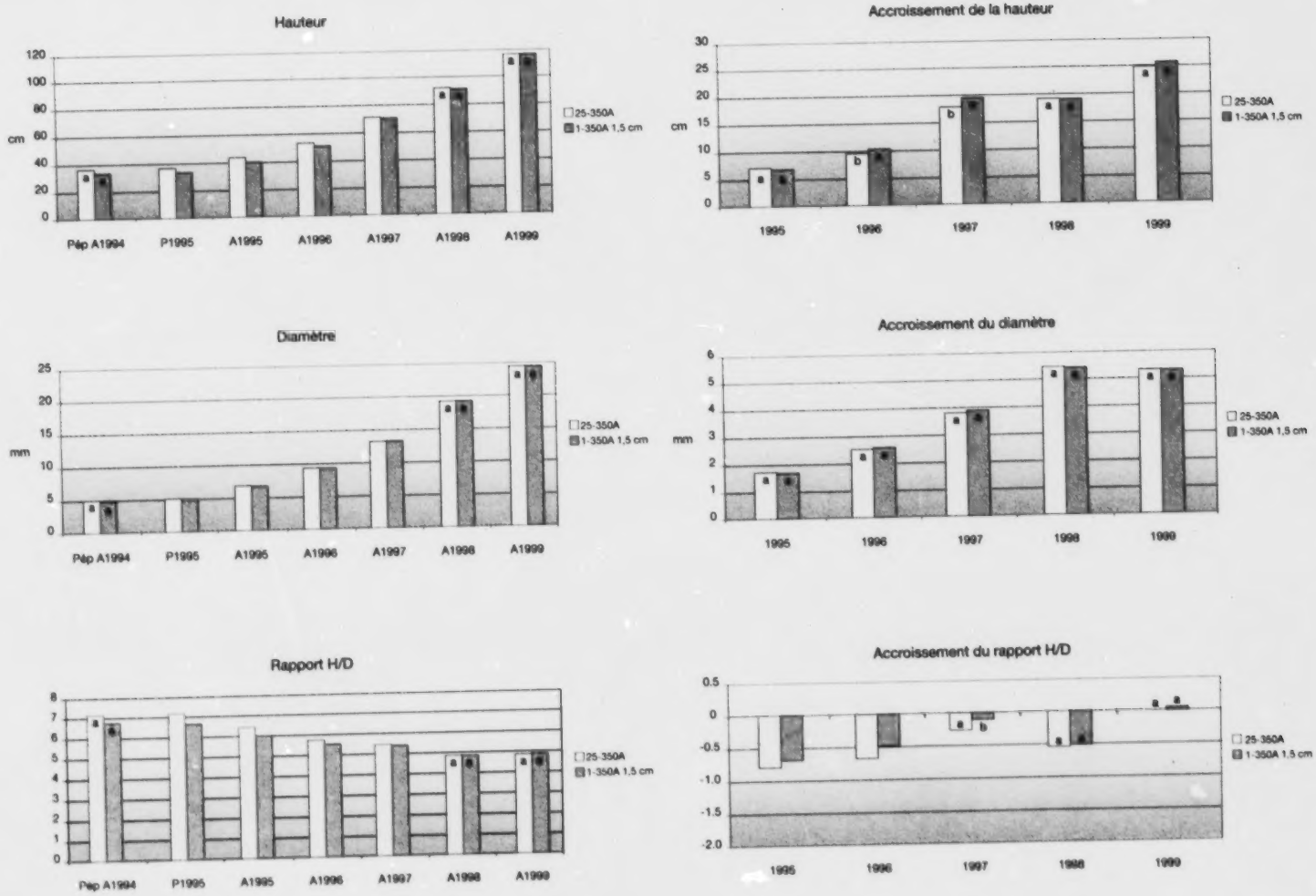
À la fin de l'été 1998, les concentrations en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse dans les aiguilles sont semblables (α=0,05) entre les plants témoins (*15-320*) et les plants produits dans le récipient *1-360A* à 2,0 cm d'espacement (Tableau 1). À la fin de la période de culture en pépinière (1993), les concentrations en azote,

On peut noter sur cette figure les brûlures à certaines pousses terminales imputables à un gel tardif au printemps 1998

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski – site forestier (N 47° 57' 30,3", W 68° 24' 23,7");
- Année de la coupe : 1991 - avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993);
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,5 m x 3,0 m (avec des plants supplémentaires intercalés à 1,5 m le long des sillons).

Figure 8.

Plant d'Épinette blanche (dispositif P93.1 – récipient *1-360A* à 1,0 cm) à la cinquième année (1998) de plantation



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

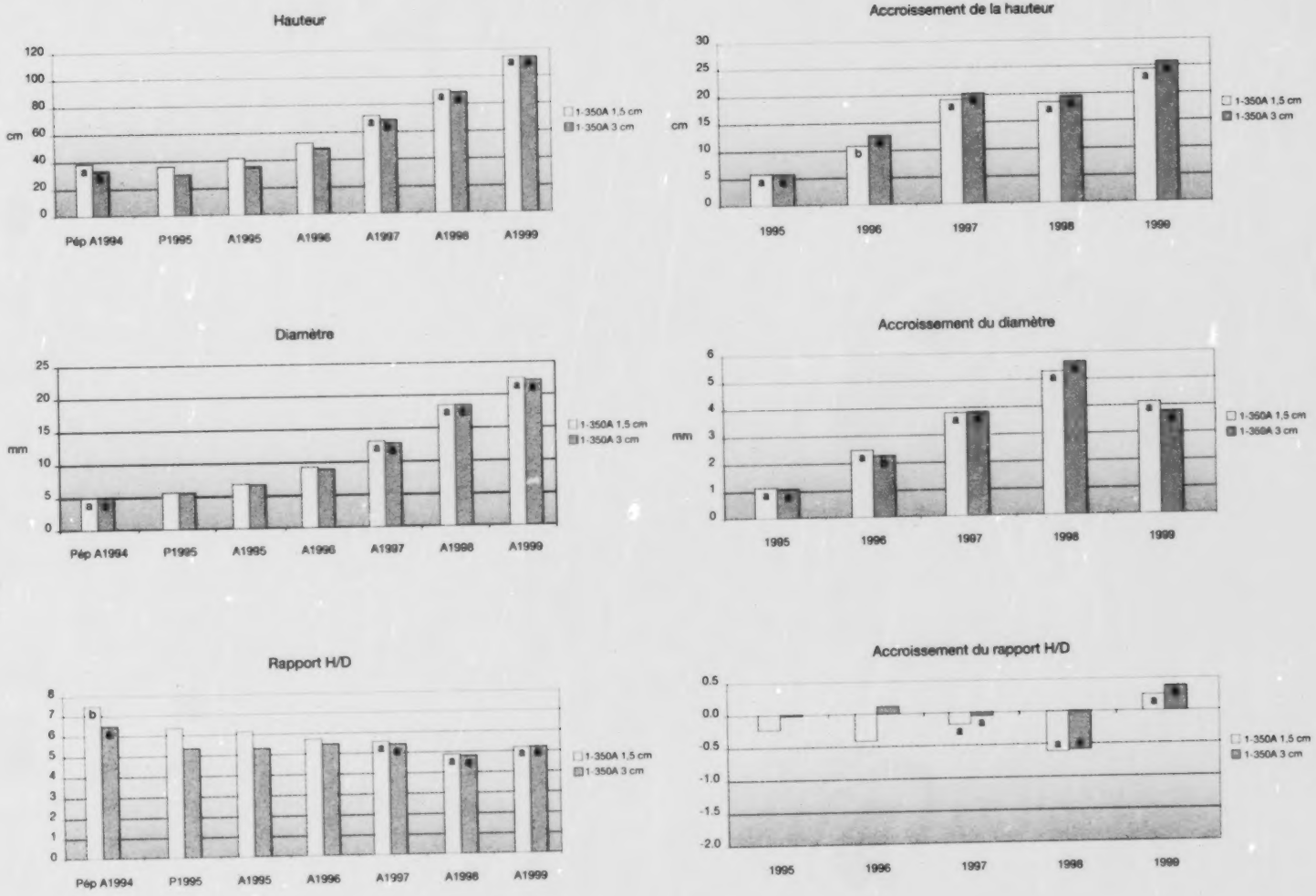
Figure 9.

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) - dispositif P94.1 Épinette blanche

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski - site forestier (N 47° 57' 41,9", W 68° 24' 35,4");
- Année de la coupe : 1991 – avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993). Le scarificateur à disques a dû être utilisé en 1995 pour dégager les lignes de plantation;
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,0 m x 2,0 m.

Figure 10.

Plant d'Épinette blanche (dispositif P94.1) à la cinquième année (1999) de plantation



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 11

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) - dispositif P94.2 Epinette blanche

- Plantations dans la Réserve Faunique de Rimouski - site forestier (N 47° 57' 41,9", W 68° 24' 35,4");
- Année de la coupe : 1991 – avec mise en andains;
- Peuplement d'origine : Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes;
- Zone écologique : sapinière à Bouleau jaune;
- Préparation de terrain : rotoculteur (1993). Le scarificateur à disques a dû être utilisé en 1995 pour dégager les lignes de plantation;
- Outil de mise en terre : pioche forestière;
- Densité de reboisement : 2,0 m x 2,0 m.

Figure 12.

Plant d'Épinette blanche (dispositif P94.2) à la cinquième année (1999) de plantation

phosphore et potassium étaient également semblables entre les deux traitements (voir le tableau 8 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

3.2.2 P93.1 Épinette blanche

Les concentrations en minéraux (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse) dans les aiguilles sont identiques (α=0,05) à la fin de la cinquième saison de plantation pour les plants produits dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm (Tableau 1). Un ajustement de la concentration en azote s'est toutefois effectué dans la plantation, car à la fin de la période de culture en pépinière (1993), les plants produits dans le récipient *15-320* avaient une concentration en azote significativement plus élevée que ceux cultivés dans le récipient *1-360A* à 2,0 cm (voir le tableau 8 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

3.2.3 P94.1 Épinette blanche

À l'automne 1999, la concentration en azote dans les aiguilles des plants cultivés dans le récipient *1-350A* à 1,5 cm est significativement supérieure (α=0,05) à celle des plants produits dans le récipient *25-350A* (témoin). Pour les autres éléments minéraux (phosphore, potassium, calcium et magnésium), les concentrations sont semblables au seuil de α=0,05 (Tableau 1). La différence dans la concentration en azote entre les deux traitements est apparue sur le site de reboisement puisqu'en 1994 (fin de la culture en pépinière), aucune différence significative n'avait été mesurée pour l'azote, le phosphore et le potassium entre les deux traitements (voir le tableau 10 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

3.2.4 P94.2 Épinette blanche

Les plants produits dans le récipient *1-350A* à 3,0 cm ont une concentration en azote dans les aiguilles supérieure (α=0,05) à ceux produits dans le même récipient à 1,5 cm d'espacement à la fin de la cinquième saison de plantation (Tableau 1). Pour les autres éléments minéraux (phosphore, potassium, calcium et magnésium), aucune différence significative (α=0,05) n'est observée. Des modifications au statut nutritif des plants se sont effectuées en plantation. En effet, à la fin de la culture dans la pépinière (automne 1994), les concentrations en azote et en phosphore étaient identiques pour les deux traitements tandis que la concentration en potassium était significativement plus élevée pour les plants produits à 1,5 cm d'espacement (voir le tableau 11 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

Tableau 1.

Concentrations en éléments minéraux des plants des dispositifs P93.1 Épinette noire, P93.1 Épinette blanche, P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche à la cinquième année de plantation

Dispositif	Traitement	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
P93.1 Epn	*15-320*	1,49 a	0,16 a	0,56 a	0,16 a	0,06 a	0,05 a
	1-360A à 2,0 cm	1,45 a	0,15 a	0,54 a	0,17 a	0,07 a	0,05 a
P93.1 Epb	*15-320*	1,12 a	0,12 a	0,54 a	0,17 a	0,05 a	0,02 a
	1-360A à 2,0 cm	1,14 a	0,12 a	0,53 a	0,19 a	0,05 a	0,02 a
P94.1 Epb	*25-350A*	1,64 b	0,19 a	0,50 a	0,50 a	0,08 a	
	1-350A à 1,5 cm	1,70 a	0,19 a	0,51 a	0,47 a	0,08 a	
P94.2 Epb	*1-350A* à 1,5 cm	1,51 b	0,17 a	0,52 a	0,42 a	0,08 a	
	1-350A à 3,0 cm	1,64 a	0,18 a	0,50 a	0,43 a	0,08 a	

Verticalement, pour chaque dispositif, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 0,05 selon le test de Tukey.

Les récoltes ont été effectuées à la fin de l'été 1998 (98/07/07) pour les dispositifs P93.1 Epn et P93.1 Epb et à l'automne 1999 (99/10/01) pour les dispositifs P94.1 Epb et P94.2 Epb.

3.3 Développement racinaire

3.3.1 P93.1 Épinette noire

Le nombre de nouvelles racines qui se sont formées hors de la carotte d'origine est semblable (α=0,05) cinq ans après la mise en terre (Tableau 2). Près de 19 (18,9) nouvelles racines > 1,0 cm se sont développées pour les plants produits dans le *15-320* et, pour le *1-360A* à 2,0 cm, ce nombre est de 23,4. La distribution sur 360° des nouvelles racines est comparable (p=0,4536) entre les deux types de récipients (Figure 13). L'examen du graphique nous indique que la répartition des racines sur le plan horizontal est bonne (classes 3,5, 4,0 et 4,5) pour le *15-320* et le *1-360A* à 2,0 cm. La distribution verticale des nouvelles racines, également identique (p=0,4675), est élevée pour les deux traitements. On observe toutefois des différences significatives (p=0,0007) entre le récipient témoin (*15-320*) et le *1-360A* à 2,0 cm (Figure 13) pour l'enroulement des racines dans le haut de la carotte. En effet, les plants produits dans un récipient avec des cavités rondes (*15-320*) présentent beaucoup plus de racines qui se développent en spirale dans le haut de la carotte.

Le nombre de plants qui ont produit des racines adventives est identique (p=0,1490) pour les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm. Des 16 plants évalués, neuf plants cultivés dans le récipient *15-320* ont développé des racines adventives tandis que seulement quatre plants en ont produit avec le récipient *1-360A* à 2,0 cm. Au seuil α=0,05, le nombre de racines adventives qui se sont développées au-dessus de la carotte d'origine n'est pas différent selon les analyses statistiques (p=0,0502). La figure 13 présente la distribution du nombre de racines adventives par classe de fréquence. Les plants cultivés dans le récipient *15-320* ont produit une moyenne de 1,3 racine adventive par plant tandis que cette valeur est de 0,4 pour le *1-360A* à 2,0 cm. La distribution sur 360° des racines adventives est comparable (p=0,2566) entre les traitements et elle est très faible. Le diamètre moyen des racines adventives est semblable (α=0,05). Le diamètre des racines adventives des plants cultivés dans le récipient *15-320* est de 8,2 mm tandis que pour le *1-360A* à 2,0 cm, cette valeur est de 5,1 mm (Tableau 2). La figure 14 présente des exemples de développement racinaire pour les plants d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation.

Pour les masses anhydres des différentes sections du système racinaire (carotte d'origine, racines hors de la carotte d'origine et totale), aucune différence significative (α=0,05) n'est observée cinq ans après la mise en terre (Tableau 2). On observe cependant des différences pour la masse des racines adventives (p=0,0454) en faveur du récipient *15-320* (Figure 13). La masse anhydre du système racinaire des semis cultivés dans le récipient *15-320* s'est accrue de façon plus importante dans la plantation puisqu'elle était significativement inférieure à celle du *1-360A* à 2,0 cm à la fin de la culture en pépinière (voir le tableau 8 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

Tableau 2.

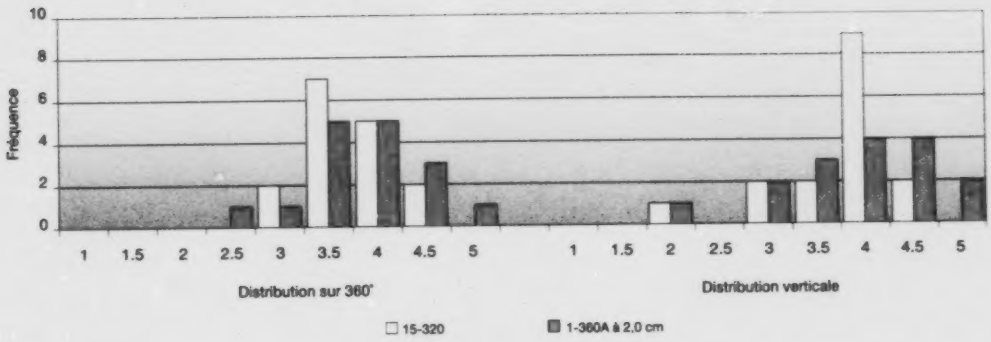
Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08)

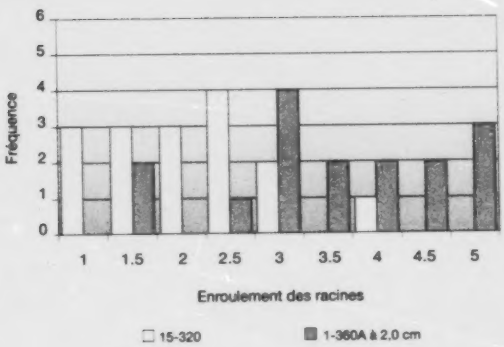
Traitement	Diamètre des racines adventives [1] (mm)	Nombre de racines hors de la carotte d'origine	Masse des racines hors de la carotte d'origine [1] (g)	Masse de carotte d'origine [1] (g)	Masse racinaire totale [2] (g)
15-320	8,23 a	18,9 a	20,0 a	52,7 a	77,8 a
1-360A à 2,0 cm	5,10 a	23,4 a	23,1 a	48,5 a	71,9 a

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 0,05 selon le test de Tukey.

[1] Analyse effectuée sur le log.

[2] Masse racinaire totale = Σ masses (racines adventives, racines hors de la carotte d'origine et carotte d'origine).





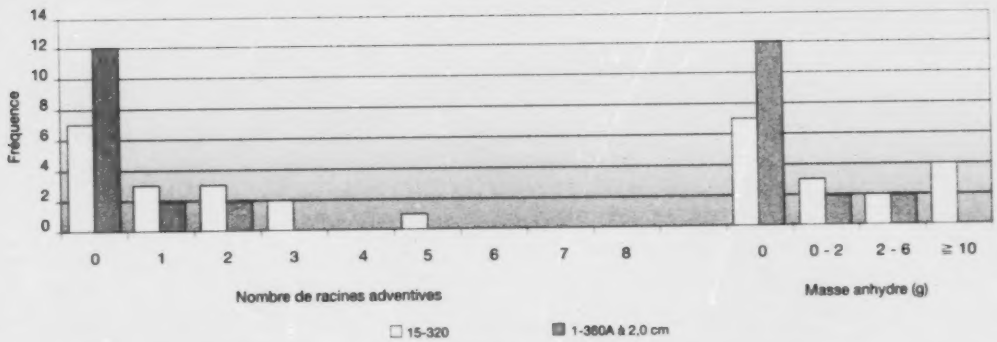
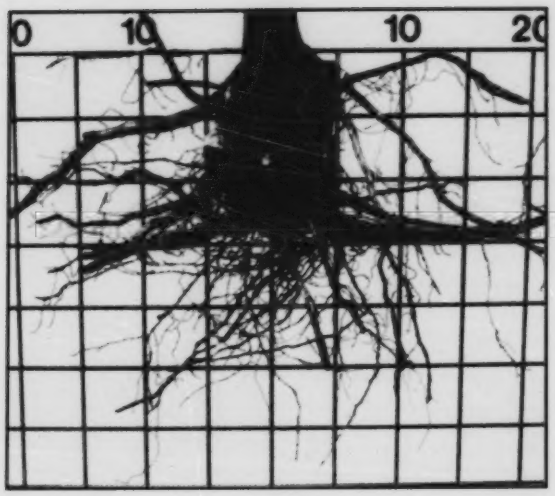
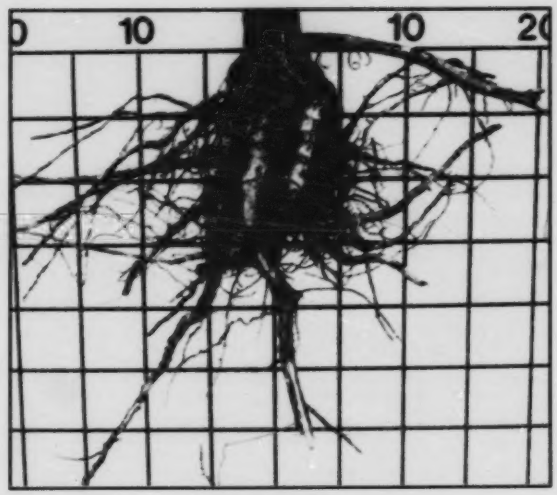


Figure 13.

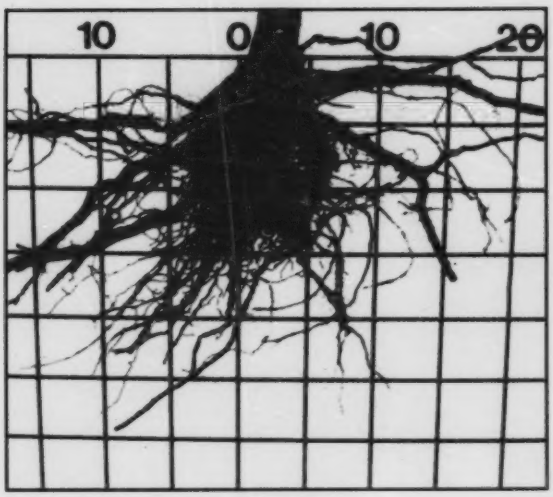
Développement racinaire de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08)



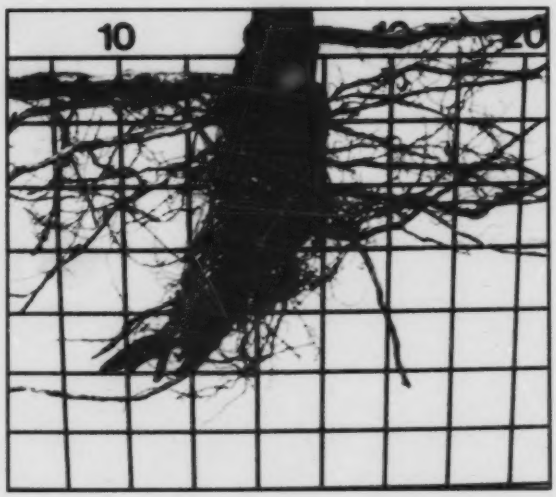
15-320 (a)



15-320 (b)



1-360A à 2,0 cm (a)



1-360A à 2,0 cm (b)

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 14.

Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08)

Les autres paramètres évalués sur les systèmes racinaires (persistance de la carotte d'origine, enchevêtrement des racines, déformations à la base de la carotte et écoulement de résine) sont semblables entre les deux traitements (p=0,6866, p=0,4127, p=0,9527 et p=1,0000 respectivement). Pour les deux récipients, la persistance de la carotte d'origine est très évidente (Figure 15). Même cinq ans après la mise en terre, on peut très facilement voir la carotte d'origine et identifier le type de récipient dans lequel le plant a été produit. Certaines des racines présentes dans la carotte ont crû de façon très importante. L'enchevêtrement des racines est également très élevé. Des déformations à la base des carottes sont présentes dans une proportion élevée. Un seul plant analysé présentait un écoulement de résine qui peut être associé à une infection par l'Armillaire.

3.3.2 Plants d'Épinette noire naturellement établis

Les caractéristiques morphologiques des plants d'Épinette noire régénérés naturellement sont présentées au tableau 3. Les plants sélectionnés, âgés en moyenne de dix ans, ont une hauteur de 122 cm et un diamètre au collet de 26,5 mm. La dimension de ces plants est voisine de celle des Épinettes noires du dispositif P93.1 Epn à la fin de la quatrième année de plantation (Figure 5). Les concentrations en minéraux (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse) des plants naturels d'Épinette noire sont également présentées au tableau 3. Les concentrations en azote et en potassium sont plus faibles que celles mesurées dans les plants du dispositif P93.1 Epn.

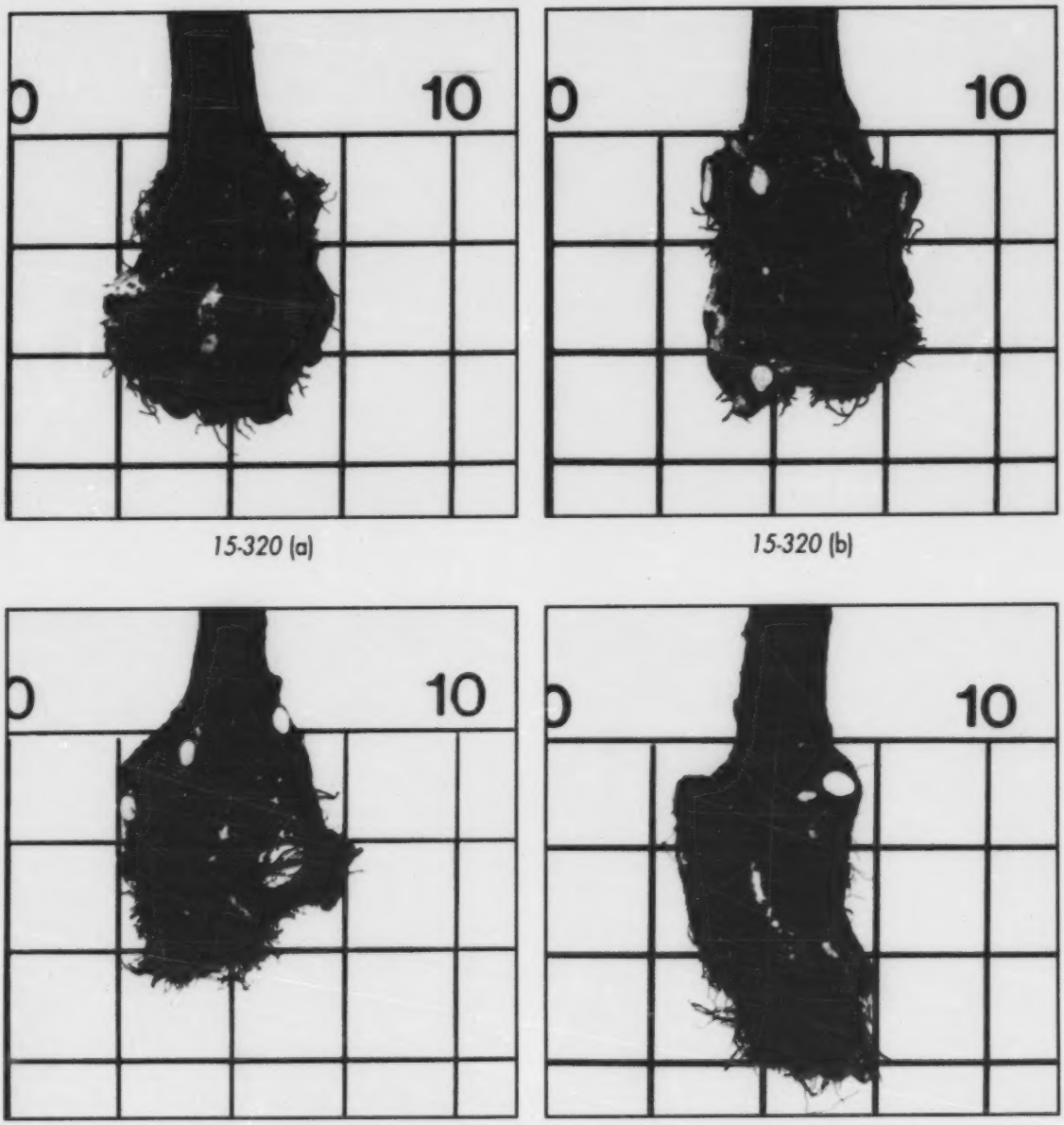
Les plants régénérés naturellement présentent en moyenne 14 racines latérales de premier ordre qui se sont développées le long de la racine principale. Ces racines, pour la plupart de fort diamètre sont généralement très bien réparties dans le sol. L'analyse par tableaux de fréquence de la répartition des racines sur 360° indique que la plupart des 17 plants se retrouvent dans les classes supérieures (2,5 [2 plants], 3,0 [1 plant], 3,5 [4 plants], 4,0 [4 plants] et 4,5 [6 plants]) qui correspondent aux critères bon et élevé (Annexe E). La distribution verticale des racines dans le sol présente des valeurs légèrement plus faibles que celles de la distribution sur 360° (2,5 [2 plants], 3,0 [4 plants], 3,5 [5 plants], 4,0 [3 plants] et 4,5 [3 plants]). Les systèmes racinaires des plants naturels ne présentent pas les malformations typiques de la culture en récipients (formation de chignon, enchevêtrement des racines, enroulement des racines, ...). La croissance des racines est toutefois fortement conditionnée par les caractéristiques physico-chimiques du sol et les obstacles que les racines rencontrent. L'enchevêtrement des racines (4,0 [2 plants], 4,5 [1 plant] et 5 [14 plants]) est un problème presque inexistant pour les plants naturels. La présence d'écoulement de résine n'a été notée que sur deux plants. La figure 16 présente quelques exemples de développement racinaire pour les plants naturels d'Épinette noire.

3.3.3 P93.1 Épinette blanche

À la cinquième année dans la plantation, le nombre de nouvelles racines > 1,0 cm qui se sont formées hors de la carotte d'origine est semblable (α=0,05). On dénombre 19,9 racines pour le récipient *15-320* et 22,2 pour le *1-360A* à 2,0 cm d'espacement (Tableau 4). La distribution sur 360° de ces nouvelles racines est semblable (p=0,9198) entre les deux traitements (Figure 17). Pour les deux récipients, les classes 3,5 et 4,0 représentent au moins 75 % des plants. La distribution verticale des racines est également identique (p=0,3974) mais présente une répartition beaucoup plus partagée entre les différentes classes. Des différences significatives sont néanmoins observées (p=0,0004) entre le *15-320* (témoin) et le *1-360A* à 2,0 cm pour l'enroulement des racines. L'examen du graphique de la figure 17 nous indique que les racines se développent beaucoup plus en spirale dans le haut de la carotte pour les plants produits dans une cavité à section ronde (*15-320*).

Le nombre de plants qui ont développé des racines adventives est semblable (p=0,2850) pour les deux traitements. Des 16 plants analysés, des racines adventives ont été observées sur sept plants pour le récipient *15-320* tandis que pour le récipient *1-360A* à 2,0 cm, elles sont présentes sur 11 plants. Le nombre de racines adventives développées par plant est également semblable (p=0,4185) pour les deux traitements. On obtient en moyenne 1,7 racine adventive pour le récipient *15-320* et 2,3 pour le récipient *1-360A* à 2,0 cm (Figure 17). La distribution sur 360° des racines adventives ne présente pas de différence significative (p=0,0795) entre les deux traitements et se situe entre les classes 1,5 et 3,5. Le diamètre moyen des racines adventives des plants produits dans le récipient *15-320* est de 5,9 mm tandis que cette valeur est de 4,8 mm pour le *1-360A* à 2,0 cm (Tableau 4). L'analyse statistique ne démontre pas de différence (α=0,05) entre ces deux valeurs. Des exemples de développement racinaire à la cinquième année de plantation sont présentés à la figure 18.

L'analyse des masses anhydres des différentes sections du système racinaire (racines hors de la carotte d'origine, carotte



15-320 (a) *15-320* (b)

1-360A à 2,0 cm (a) *1-360A* à 2,0 cm (b)

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 15.

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Épinette noire cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/08)

Tableau 3.

Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis d'Épinette noire régénérés naturellement

Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	H/D	Âge	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
122	26,5	4,6	10	1,26	0,16	0,49	0,21	0,06	0,04

Moyennes effectuées sur 17 plants pour les analyses morphologiques et sur trois échantillons composites pour les concentrations en éléments minéraux dans les tissus (99/07/23).

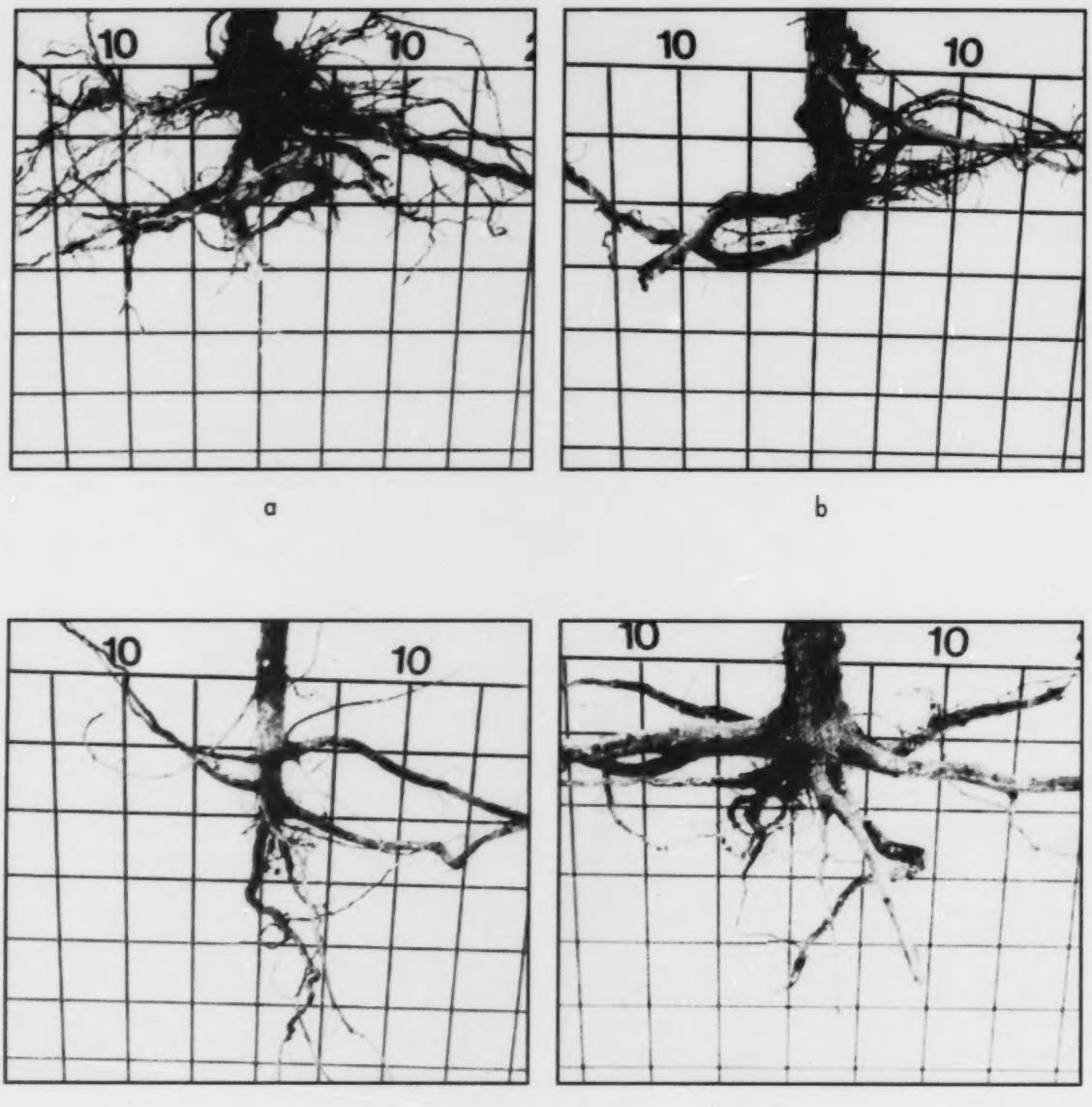
Tableau 4.

Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07)

Traitement	Diamètre des racines adventives [1] (mm)	Nombre de racines hors de la carotte d'origine	Masse des racines hors de la carotte d'origine (g)	Masse de carotte d'origine [2] (g)	Masse racinaire totale [2 3] (g)
15-320	5,94 a	19,9 a	8,72 a	31,4 a	43,4 a
1-360A à 2,0 cm	4,80 a	22,2 a	9,41 a	28,3 a	40,0 a

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

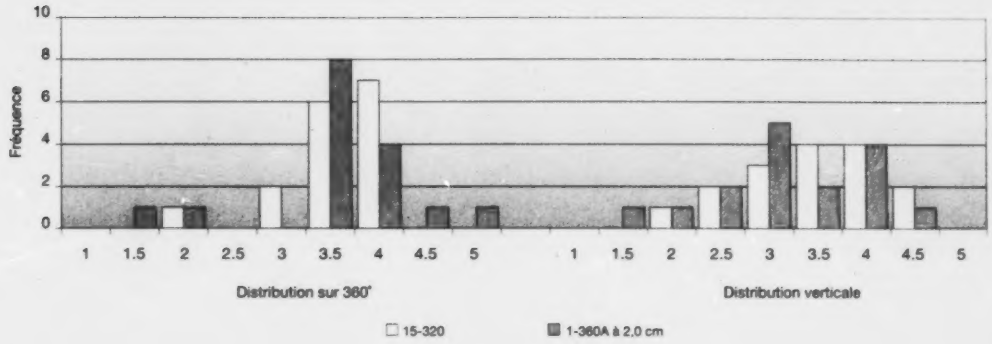
[1] Analyse effectuée sur la racine carrée.
[2] Analyse effectuée sur le log.
[3] Masse racinaire totale = Σ masses (racines adventives, racines hors de la carotte d'origine et carotte d'origine).

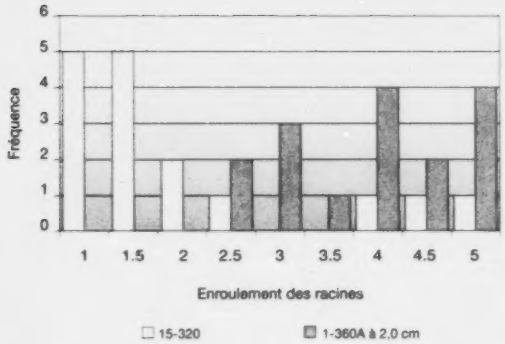


Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 16.

Exemples de développement racinaire de plants d'Épinette noire régénérés naturellement (99/07/23)





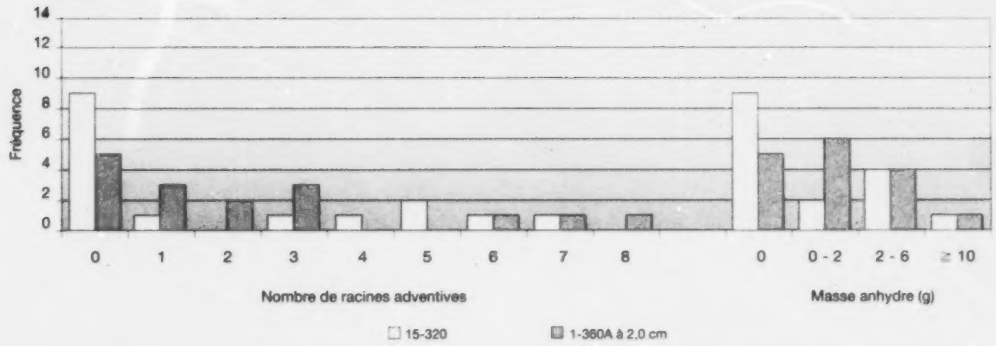
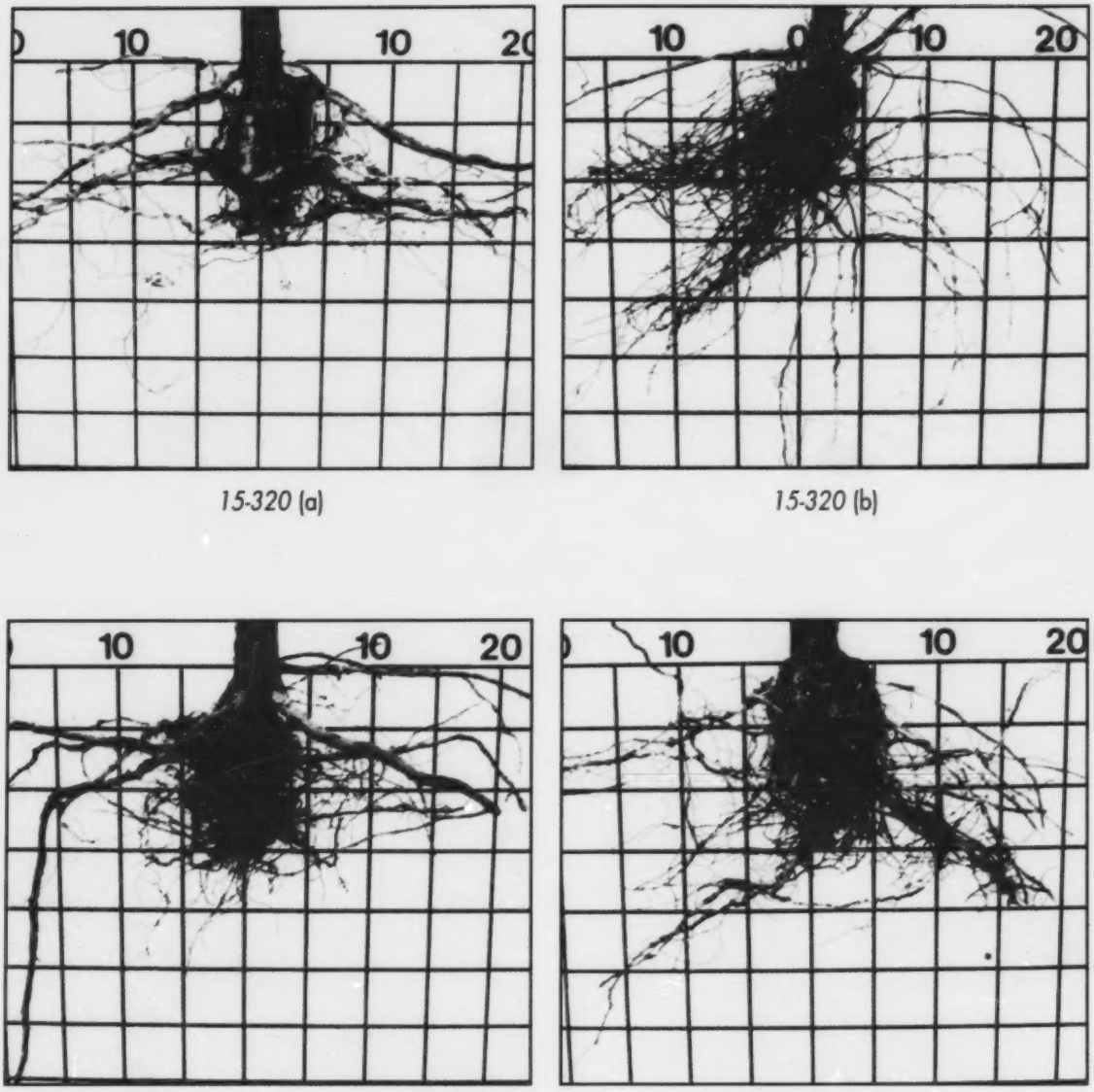


Figure 17.

Développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07)



15-320 (a)

15-320 (b)

1-360A à 2,0 cm (a)

1-360A à 2,0 cm (b)

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 18.

Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07)

d'origine et totale) à la cinquième année de plantation ne fait ressortir aucune différence significative (α=0,05) entre les deux traitements (Tableau 4). La même observation (p=0,3783) s'applique à la masse des racines adventives (Figure 17). Tel que mentionné pour l'Épinette noire (Section 3.3.1), l'accroissement de la masse racinaire des plants produits dans le récipient *15-320* a été plus importante cinq ans après la mise en terre, car elle était significativement inférieure à celle du *1-360A* à 2,0 cm à la fin de la période de culture en pépinière (voir le tableau 8 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

La persistance de la carotte d'origine, l'enchevêtrement des racines, les déformations à la base de la carotte et l'écoulement de résine sont semblables (p=0,2469, p=0,1178, p=0,3468 et p=1,0000 respectivement). On peut observer cinq ans après la mise en terre (Figure 19) que la carotte d'origine est toujours très visible. Plus de 80 % des plants sont compris dans les classes 1,0, 1,5 et 2,0. Ces trois classes comprennent également près de 70 % des plants pour l'enchevêtrement des racines. On observe que plusieurs racines ont crû de façon importante en conservant leur configuration déformée issue de la culture en récipients. Des malformations importantes à la base des carottes ont été également observées pour les deux traitements. Des écoulements de résine ont été notés sur deux plants témoins (*15-320*), tandis que ce phénomène n'a été constaté que sur un plant pour le traitement *1-360A* à 2,0 cm. Comme pour l'Épinette noire (Section 3.3.1), l'écoulement de résine est causé par la présence de l'Armillaire.

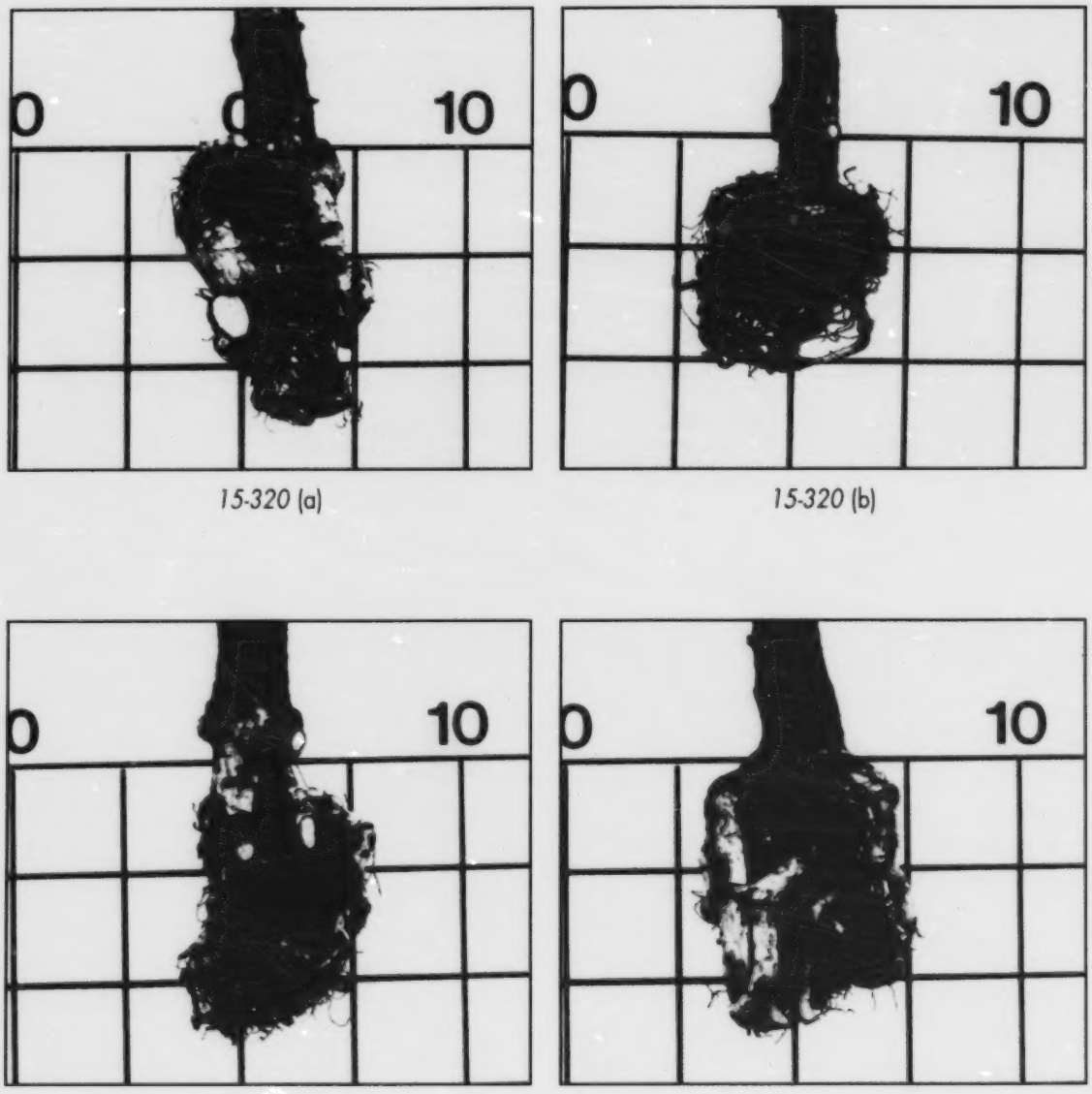
3.3.4 P94.1 Épinette blanche

À la cinquième année, des différences significatives (α=0,05) sont observées entre les deux traitements pour le nombre de racines > 1,0 cm qui se sont développées à partir de la carotte d'origine. En effet, les plants cultivés dans le récipient *25-350A* (témoin) ont produit en moyenne 24,0 nouvelles racines contre 17,0 pour le *1-350A* à 1,5 cm d'espacement (Tableau 5). Par contre, la distribution des racines sur 360° est semblable (p=0,9163) pour les deux récipients. Comme on peut l'observer sur le graphique de la figure 20, la majorité des plants se situent dans les classes moyenne à bonne (3,0, 3,5 et 4,0). La distribution verticale des racines est également similaire (p=0,3025) entre les deux traitements. On peut toutefois noter que la plupart des plants se retrouvent dans les classes 3,0 ou plus, ce qui correspond à une bonne distribution des racines sur le plan vertical. L'enroulement des racines dans le haut de la cavité a été peu observé sur les plants examinés et aucune différence (p=0,9810) n'a été mesurée entre les deux traitements (Figure 20). Pour les deux types de récipients, 63 % des plants ne présentent aucun enroulement de racines et plus de 87 % des plants sont compris dans les classes 4,0 ou supérieure.

La présence de racines adventives a été observée sur 12 plants pour le récipient *1-350A* à 1,0 cm et sur 8 plants pour le récipient *25-350A*. Aucune différence significative n'a toutefois été mesurée (p=0,3800) entre les deux types de récipients. Le nombre moyen de racines adventives par plant est également semblable (p=0,2576) entre les deux traitements. On note en moyenne la présence de 1,4 racine adventive pour le récipient *1-350A* et de 1,1 racine pour le *25-350A* (témoin). Le dernier graphique de la figure 20 présente la répartition par tableau de fréquence du nombre de racines adventives. Pour les deux récipients, la distribution des racines adventives sur 360° est semblable (p=0,2624) et est relativement faible. Le diamètre moyen des racines adventives est aussi semblable (α=0,05) pour les deux traitements (Tableau 5). Il est de 6,3 mm pour le *25-350A* et de 7,3 mm pour le récipient *1-350A* à 1,5 cm. La figure 21 présente deux exemples de développement racinaire pour chacun des traitements.

Les masses anhydres des racines qui se sont développées hors de la carotte d'origine sont identiques (α=0,05) pour les plants produits dans les deux modèles de récipients (Tableau 5). La même observation peut être faite pour la masse de la carotte d'origine (α=0,05), la masse racinaire totale (α=0,05) ainsi que pour la masse des racines adventives (p=0,1983). Contrairement à ce qui a été mentionné pour l'Épinette blanche (Section 3.3.3), l'accroissement de la masse des racines a été semblable entre les deux traitements cinq ans après la mise en terre, parce que les plants avaient une masse racinaire similaire à la fin de leur culture en pépinière (voir le tableau 10 dans GINGRAS et RICHARD 1999).

Aucune différence significative (p=0,3303) n'a été observée entre les deux types de récipients pour la persistance de la carotte d'origine. La même observation peut être faite pour l'enchevêtrement des racines (p=0,5714), les déformations à la base de la carotte (p=0,3836) et l'écoulement de résine (p=0,4940). La figure 22 présente des systèmes racinaires où les racines hors de la carotte d'origine ont été enlevées. On peut y observer que plusieurs racines présentes dans la carotte au moment de la mise en terre ont continué à croître au même endroit en conservant des malformations importantes. On note également que la forme de la carotte d'origine est toujours



Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 19

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Epinette blanche cultivés dans les récipients *15-320* et *1-360A* à 2,0 cm à la cinquième année de plantation (98/07/07)

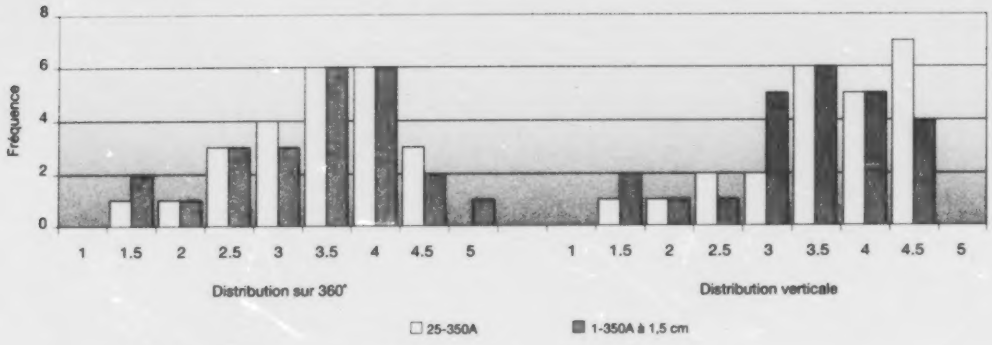
Tableau 5.

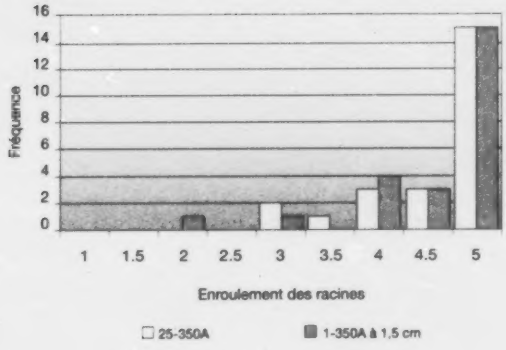
Analyse des systèmes racinaires des semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19)

Traitement	Diamètre des racines adventives (mm)	Nombre de racines hors de la carotte d'origine	Masse des racines hors de la carotte d'origine [1] (g)	Masse de la carotte d'origine [2] (g)	Masse racinaire totale [3] (g)
25-350A	6,31 a	24,0 a	10,7 a	33,1 a	48,4
1-350A à 1,5 cm	7,26 a	17,0 b	10,6 a	34,6 a	48,7

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

[1] Analyse effectuée sur la racine carrée.
[2] Analyse effectuée sur le log.
[3] Masse racinaire totale = Σ masses (racines adventives, racines hors de la carotte d'origine et carotte d'origine).





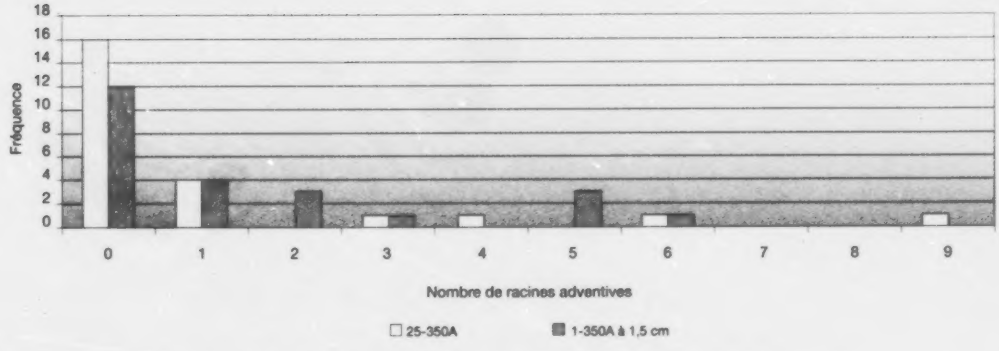
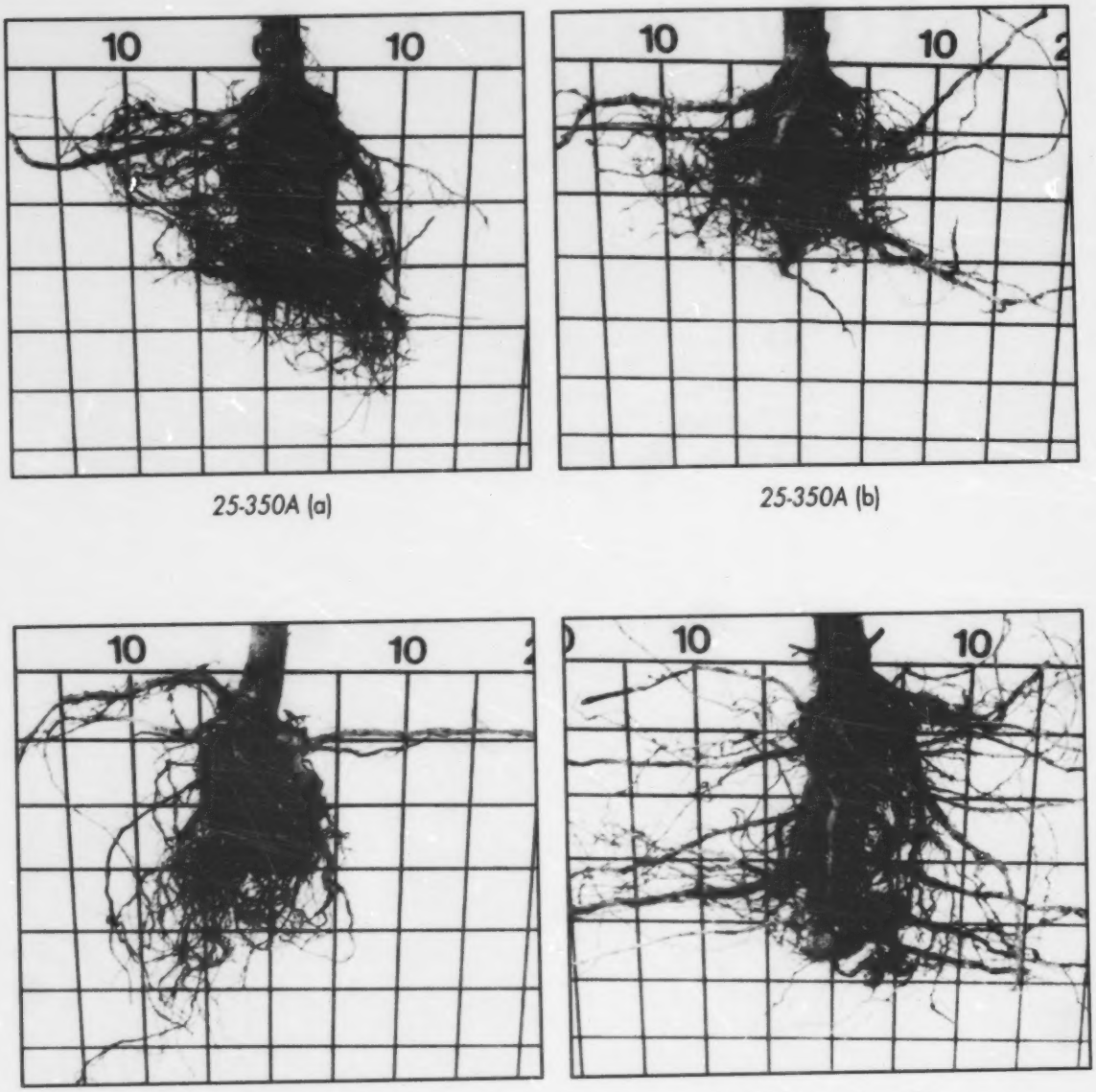


Figure 20.

Developpement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19)



25-350A (a)

25-350A (b)

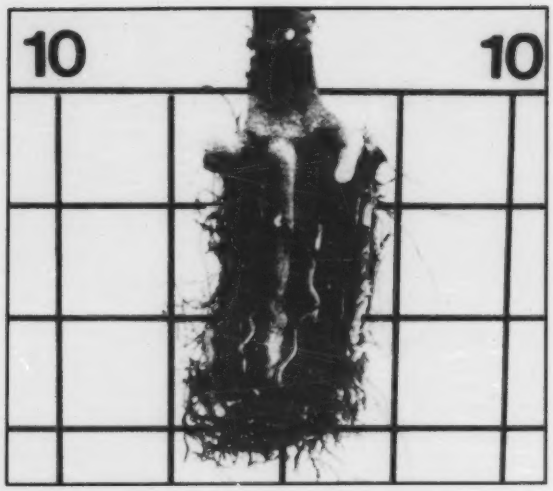
1-350A à 1,5 cm (a)

1-350A à 1,5 cm (b)

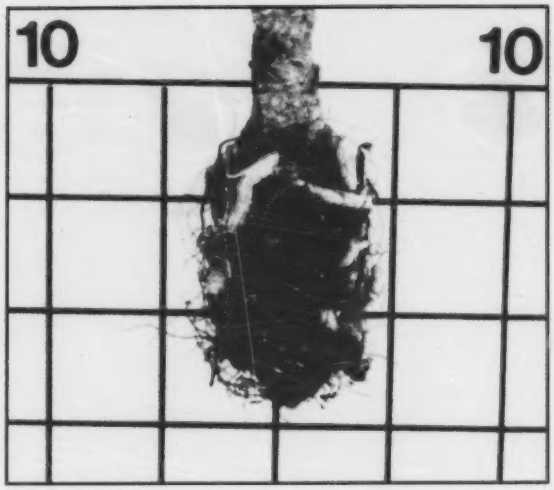
Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 21.

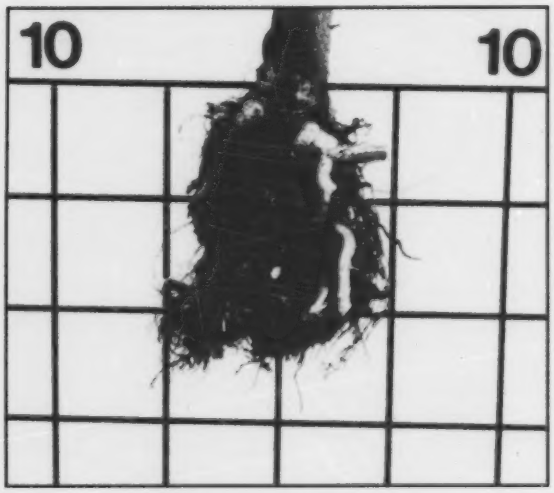
Exemples de développement racinaire de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19)



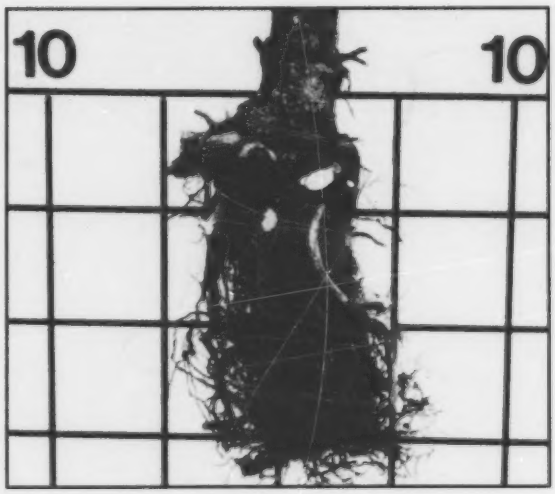
25-350A (a)



25-350A (b)



1-350A à 1,5 cm (a)



1-350A à 1,5 cm (b)

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 22.

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis d'Épinette blanche cultivés dans les récipients *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/07/19)

visible cinq ans après la mise en terre. L'enchevêtrement des racines est également visible et est distribué normalement entre les différentes classes avec toutefois des valeurs plus élevées aux classes 1,5, 2,0, 4,0 et 4,5. Les déformations à la base de la carotte ont été peu observées avec plus de 87 % des plants avec des valeurs de 3,5 et plus. Des écoulements de résine, imputables à la présence de l'Armillaire, ont été observés sur sept plants pour le récipient *1-350A* à 1,5 cm et sur quatre plants pour le *25-350A*.

3.3.5 Plants d'Épinette blanche naturellement établis

Le tableau 6 présente les caractéristiques morphologiques de plants d'Épinette blanche qui se sont développés naturellement. Les plants, âgés en moyenne de sept ans, ont une hauteur de 188 cm et un diamètre de 28,8 mm pour un rapport H/D de 6,5. Les concentrations en minéraux (azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium) sont également présentées au tableau 6. La concentration en azote et en phosphore est légèrement supérieure à celle des plants du dispositif P93.1 Epb et inférieure à celle des plants des dispositifs P94.1 Epb et P94.2 Epb.

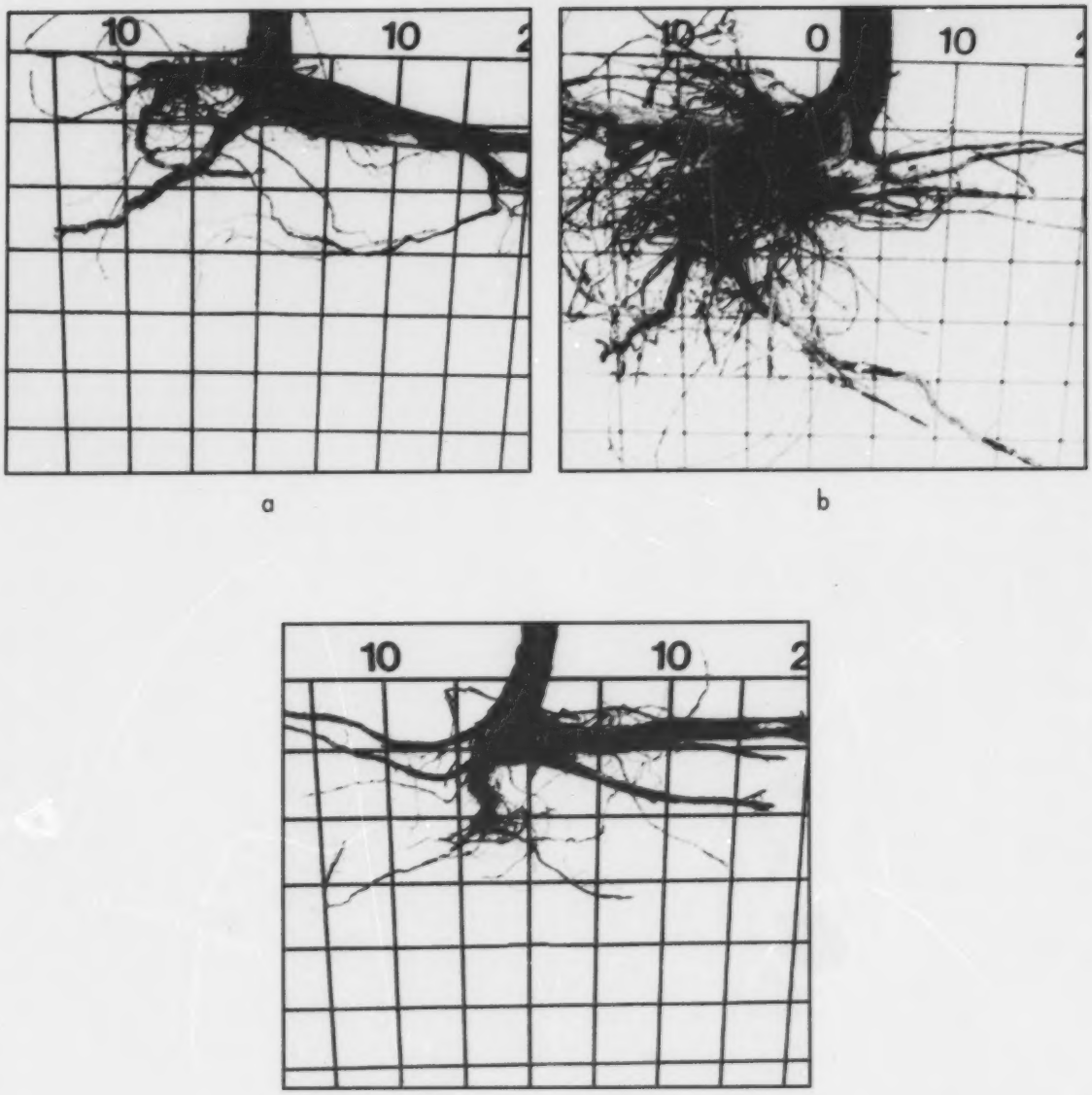
Les plants d'Épinette blanche régénérés naturellement comptent en moyenne dix racines latérales de premier ordre (généralement de structure) qui se sont développées le long de la racine principale. Les racines fines d'absorption sont situées sur ces grosses racines à une distance plus ou moins éloignée de la tige. L'analyse par tableaux de fréquence indique que quatorze des seize plants (88 %) sont dans les classes 3,5 (6 plants), 4,0 (4 plants) et 4,5 (4 plants) pour la distribution sur 360°, ce qui correspond à une bonne répartition des racines sur le plan horizontal. La répartition des racines sur le plan vertical est légèrement inférieure (2,0 [2 plants], 2,5 [1 plant], 3,0 [6 plants], 4,0 [6 plants], et 4,5 [1 plant]). Comme cela a été mentionné pour l'Épinette noire régénérée naturellement (section 3.3.2), les caractéristiques du sol influencent très fortement le développement des racines. Pour les plants d'Épinette blanche évalués, l'enchevêtrement des racines a été observé sur quelques arbres, mais est généralement faible. Les plants sont répartis dans les classes 2,0 (1 plant), 2,5 (3 plants), 3,5 (3 plants), 4,0 (5 plants) et 4,5 (4 plants). De l'écoulement de résine a été observé sur cinq plants. Les analyses effectuées par la Direction de la conservation des forêts (Ministère des Ressources naturelles du Québec) ont permis d'identifier l'Armillaire sur ces plants. Des exemples de développement racinaire sont présentés à la figure 23.

Tableau 6.

Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis d'Épinette blanche régénérés naturellement

Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	H/D	Âge	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
188	28,8	6,5	7	1,31	0,13	0,51	0,44	0,10	

Moyennes effectuées sur 16 plants pour les analyses morphologiques et sur trois échantillons composites pour les concentrations en éléments minéraux dans les tissus (99/10/01)



a b c

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 23.

Exemples de développement racinaire de plants d'Épinette blanche régénérés naturellement (99/10/01)

Chapitre quatre

Résultats des plantations feuillues

4.1 Taux de survie et croissance

4.1.1 P94.3 Bouleau jaune

À la cinquième année dans la plantation, le taux de survie des plants de Bouleau jaune est de 87,5 % pour le récipient *45-340* (témoin), de 80,5 % pour le *25-350A* et de 70,7 % pour le *1-350A* à 1,5 cm. Des différences significatives (p=0,0165) sont notées entre le *45-340* et le *1-350A* à 1,5 cm. Cet écart dans le pourcentage de survie (mortalité deux fois plus élevée dans le *1-350A* à 1,5 cm) entre ces deux récipients est apparu à la deuxième année de plantation (1996) et s'est maintenu depuis (résultats non présentés). À l'automne 1999, la hauteur des plants est semblable (p=0,7540) entre les trois traitements (*45-340* [256 cm], *25-350A* [247 cm] et *1-350A* à 1,5 cm [248 cm]). La figure 24 présente le profil de la croissance et des accroissements de la hauteur durant les cinq premières années de plantation. Les accroissements, identiques (p=0,3820) à l'automne 1999, varient de 48 cm à 53 cm. À l'exception de la première année dans la plantation (1995), les accroissements en hauteur ont été en moyenne supérieurs à 40 cm.

Les diamètres au collet du *45-340* (44,9 mm), du *25-350A* (42,1 mm) et du *1-350A* à 1,5 cm (42,8 mm) sont semblables (p=0,4169) à la fin de la cinquième année dans la plantation. Le diamètre au collet des plants cultivés dans le récipient *45-340* a progressé davantage en plantation car il était statistiquement inférieur à celui des deux autres récipients à la fin de la culture en pépinière (Figure 24). Les accroissements en diamètre en 1999 sont semblables (p=0,1144) entre les trois traitements. La même observation peut s'appliquer aux quatre autres saisons de culture. Le rapport H/D a diminué jusqu'en 1996 et est demeuré stable (≈ 6,0) par la suite. Aucune différence (p=0,4557) sur le rapport H/D n'a été mesurée entre les traitements à l'automne 1999 ainsi que sur l'accroissement du rapport H/D (p=0,7451).

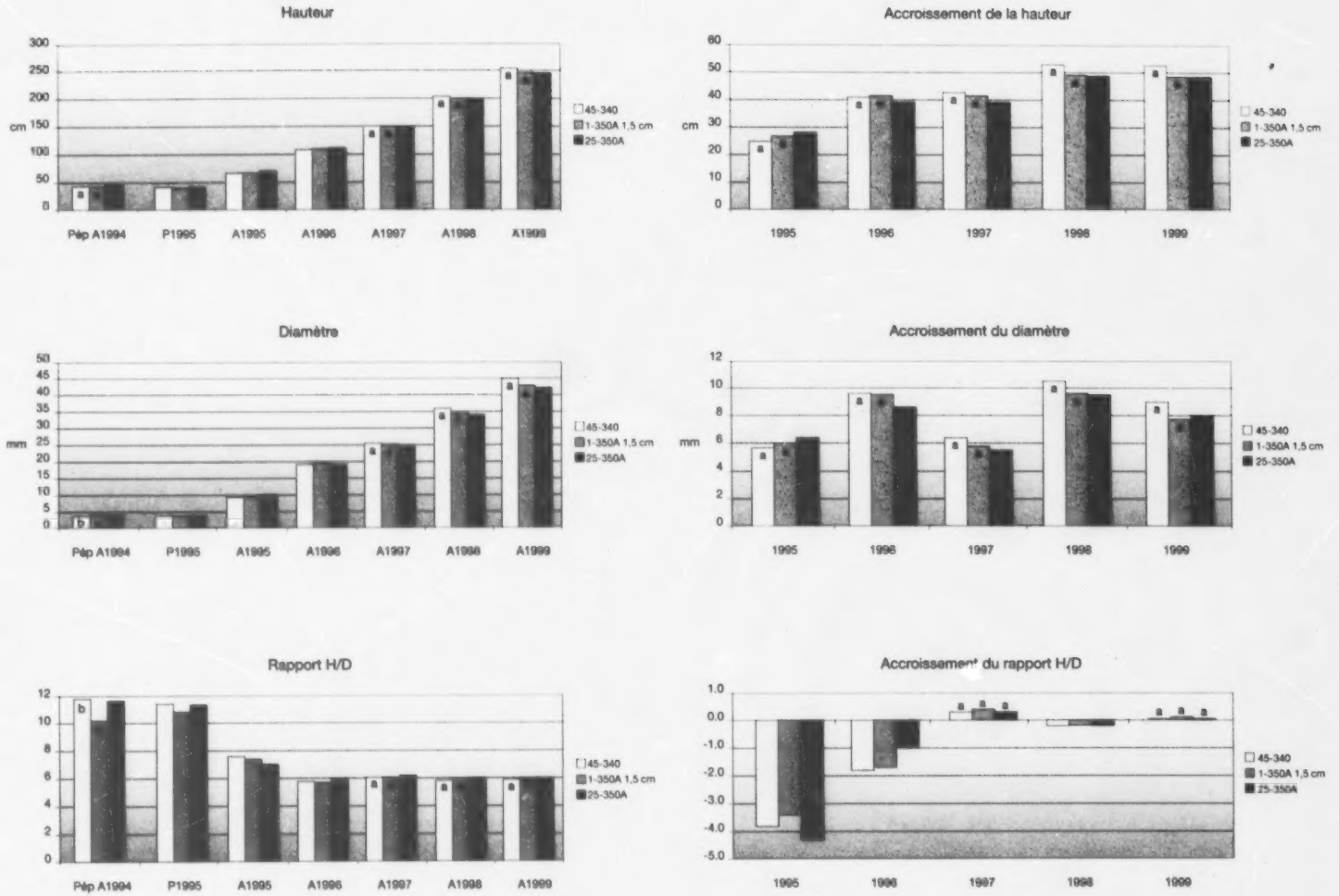
Des travaux de désherbage ont été réalisés deux à trois fois l'an ainsi que quelques coupes de formation (élagage des branches trop basses et correction des défauts de forme). La figure 25 illustre quelques plants de Bouleau jaune à l'été 1999.

4.1.2 P94.3 Chêne rouge

À la fin de leur cinquième année dans la plantation, les semis de Chêne rouge présentent des taux de survie relativement faibles. On obtient des différences significatives (p=0,0129) entre le *25-350A* (74,5 %) et le *28-340* (56,7 %). Le pourcentage de survie des plants cultivés dans le *1-350A* à 3,0 cm (72,6 %) n'est pas différent de celui des semis produits dans les deux autres récipients. Cet écart (α=0,05) entre le *25-350A* et le *28-340* a également été observé en 1995 et en 1998 (résultats non présentés). La hauteur à la cinquième année est significativement plus élevée (p=0,0207) pour les plants produits dans le récipient *25-350A* (143 cm) que ceux cultivés dans le *28-340* (118 cm). Aucune différence n'a toutefois été mesurée avec les plants cultivés dans le *1-350A* à 3,0 cm (138 cm). Les mêmes résultats ont été obtenus en 1998 (Figure 26). Les accroissements de la hauteur sont semblables (p=0,1028) à la cinquième année de plantation ainsi que pour les quatre années précédentes. Les accroissements ont été relativement modestes de 1995 à 1997 pour augmenter par la suite et atteindre entre 41 et 51 cm en 1999.

Pour le diamètre au collet, des différences significatives (p=0,0368) sont mesurées à la cinquième année entre les plants produits dans le *25-350A* (26,0 mm) et le *28-340* (22,7 mm). Les plants cultivés dans le *1-350A* à 3,0 cm (25,0 mm) ne sont pas différents des deux autres traitements (Figure 26). À l'automne 1999, les accroissements du diamètre au collet sont semblables (p=0,1437). Le rapport H/D et l'accroissement du rapport H/D sont similaires (p=0,2257 et p=0,4889) à la cinquième année de plantation. Le rapport H/D s'est stabilisé autour de 5,0 à partir de 1996.

Comme il a été mentionné précédemment pour le Bouleau jaune (Section 4.1.1), des travaux de désherbage et de coupe de formation ont été effectués au cours des cinq années. La figure 27 illustre quelques plants de Chêne rouge à l'été 1999.



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

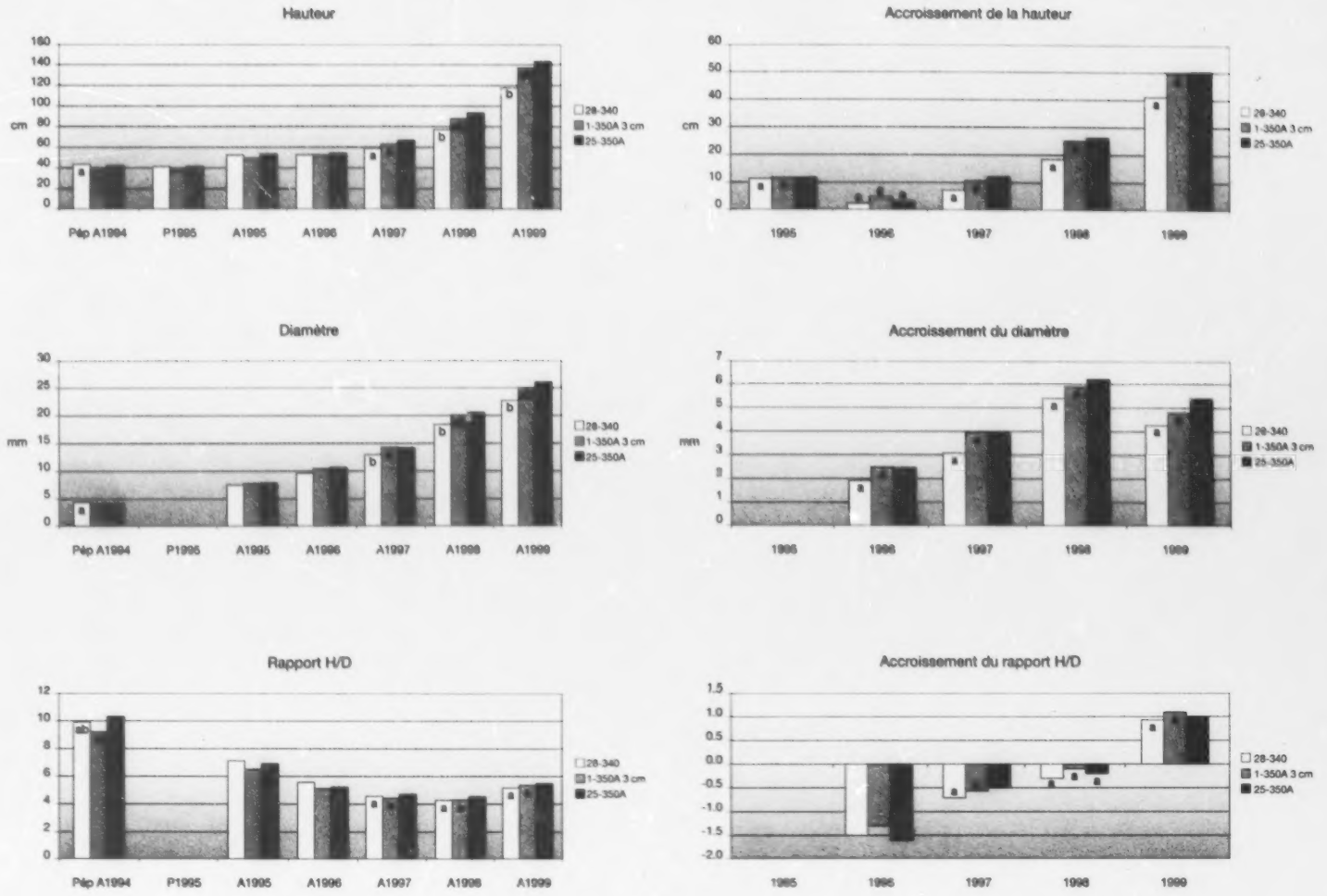
Figure 24.

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) - dispositif P94.3 Bouleau jaune

- Plantations à St-Germain-de-Grantham (N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05");
- Peuplement d'origine : terre agricole abandonnée depuis 2 à 3 ans;
- Zone écologique : érablière à Tilleul;
- Préparation de terrain : labourage et hersage agricole avec pose de paillis en longueur;
- Outil de mise en terre : pelle;
- Densité de reboisement : 3,5 m x 2,0 m;
- Protection annuelle contre les petits rongeurs et les chevreuils.

Figure 25.

Plant de Bouleau jaune (dispositif P94.3 – récipient *1-350A*) à la cinquième année (1999) de plantation



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 26.

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) - dispositif P94.3 Chêne rouge

- Plantations à St-Germain-de-Grantham (N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05");
- Peuplement d'origine : terre agricole abandonnée depuis 2 à 3 ans;
- Zone écologique : érablière à Tilleul;
- Préparation de terrain : labourage et hersage agricole avec pose de paillis en longueur;
- Outil de mise en terre : pelle;
- Densité de reboisement : 3,5 m x 2,0 m;
- Protection annuelle contre les petits rongeurs et les chevreuils.

Figure 27.

Plant de Chêne rouge (dispositif P94.3 – récipient *25-350A*) à la cinquième année (1999) de plantation

4.1.3 P94.4 Chêne rouge

Les plants de Chêne rouge produits dans les récipients de fort volume (≥1 L) présentent des taux de survie semblables (p=0,6221) cinq ans après la plantation. On obtient 71,9 % pour le *12-1000* et 74,6 % pour le *1-1050A* à 3,0 cm. Les pourcentages de survie ont également été semblables (α=0,05) durant les quatre premières années (résultats non présentés). Des baisses d'environ huit pour cent ont été notées à chacune des trois premières années (1995, 1996 et 1997). La hauteur atteinte à la fin de la cinquième saison de plantation est semblable (p=0,2818) pour les deux traitements (*12-1000* [150 cm] et *1-1050A* à 3,0 cm [167 cm]). La figure 28 présente le profil de croissance et la progression de la hauteur. Les accroissements en hauteur sont également comparables (p=0,1970) à l'automne 1999. Les accroissements ont été relativement faibles de 1995 à 1998 pour atteindre entre 45 et 54 cm en 1999.

Le diamètre au collet est semblable (p=0,1368) à la fin de la cinquième année de plantation (Figure 28). On obtient 27,9 mm pour le *12-1000* et 31,5 pour le *1-1050A* à 3,0 cm. Les accroissements du diamètre au collet sont également similaires (p=0,1105) à l'automne 1999 : 5,1 mm pour le *12-1000* et 6,5 mm pour le *1-1050A* à 3,0 cm. Le rapport H/D et l'accroissement du rapport H/D sont équivalents (p=0,5844 et p=0,4160) cinq ans après la mise en terre. Le rapport H/D a diminué jusqu'en 1996 pour se stabiliser à une valeur moyenne de 5,0.

Les mêmes travaux d'entretien que ceux mentionnés pour le Bouleau jaune (Section 4.1.1) et le Chêne rouge (4.1.2) ont été appliqués à ce dispositif expérimental. Une illustration d'un plant de Chêne rouge est présentée à la figure 29.

4.2 Concentrations en minéraux dans les tissus

4.2.1 P94.3 Bouleau jaune

Les concentrations en minéraux dans les tissus sont semblables (α=0,05) entre les trois traitements (*45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm) pour l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le manganèse. Le tableau 7 présente le bilan des analyses de laboratoire.

4.2.2 P94.3 Chêne rouge

À la fin de la cinquième saison de plantation, les concentrations en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse dans les plants de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm sont comparables (Tableau 7).

4.2.3 P94.4 Chêne rouge

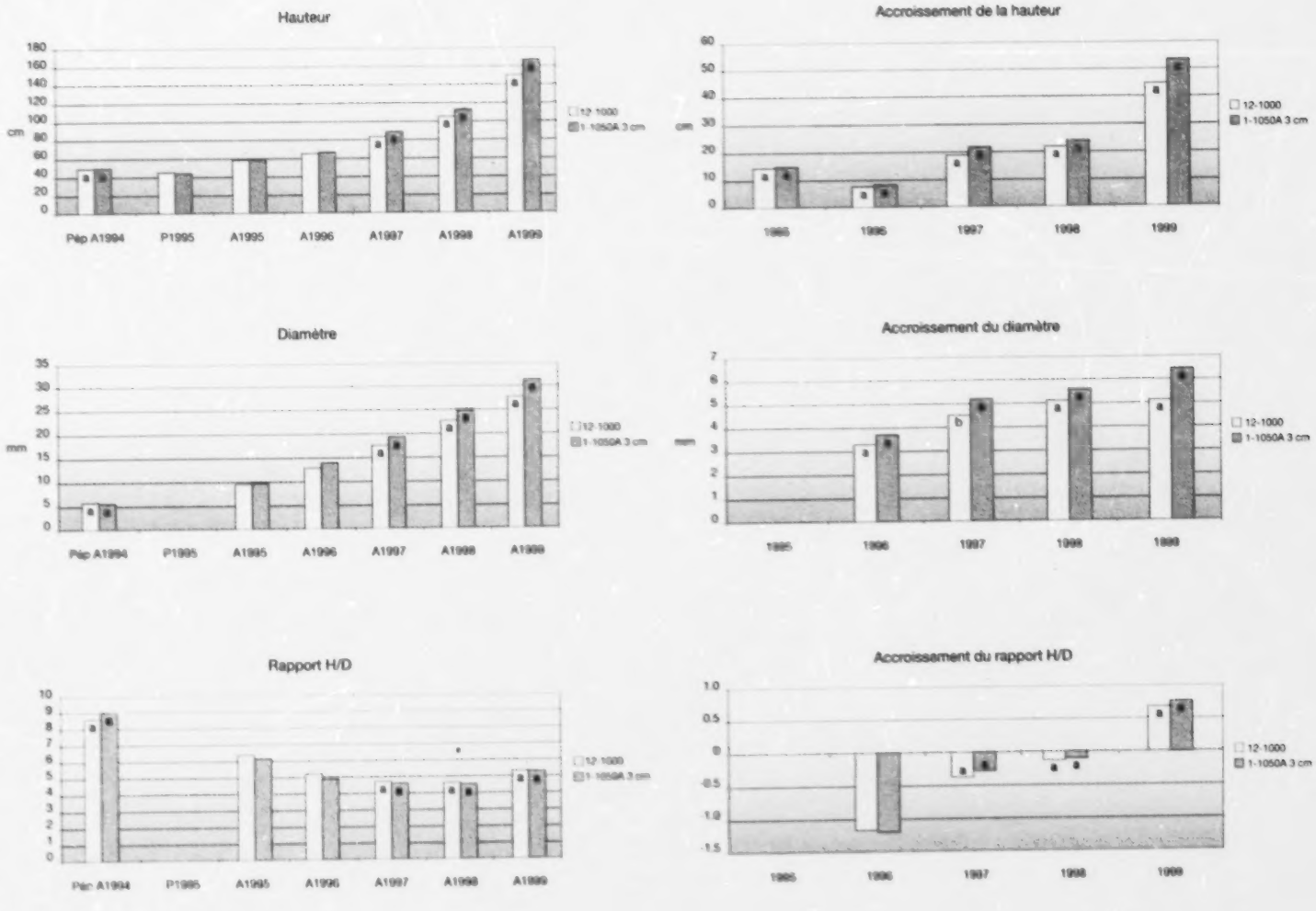
Cinq ans après la mise en terre, le bilan des analyses en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse ne présente aucune différence significative entre le *12-1000* et le *1-1050A* à 3,0 cm (Tableau 7).

4.3 Développement racinaire

4.3.1 P94.3 Bouleau jaune

Le nombre de racines > 1,0 cm qui se sont développées hors de la carotte d'origine est semblable (α=0,05) cinq ans après la mise en terre. On obtient 16,2 racines pour les plants cultivés dans le récipient *45-340* (témoin), 13,7 pour le *25-350A* et 14,8 pour le *1-350A* à 1,5 cm (Tableau 8). La distribution de ces racines sur 360° est identique (p=0,9228) pour les trois types de récipient. La figure 30 présente les graphiques de distribution de fréquence des trois traitements. Les classes 3,0 et supérieures comptent 75 % ou plus des plants, ce qui correspond globalement à une bonne distribution. La répartition des racines sur le plan vertical est également comparable (p=0,3449) entre les trois traitements. Plus de 80 % des plants se situent dans les classes 3,0 ou supérieures. On obtient ainsi une bonne distribution verticale des racines qui se sont développées à partir de la carotte d'origine. L'enroulement des racines dans le haut des carottes a été très peu observé même pour le récipient *45-340* qui a des cavités à section ronde (Figure 30). On compte au minimum 75 % des plants qui ne présentent aucun enroulement des racines pour les trois traitements. Aucune différence significative (p=0,7822) n'est notée.

Des 16 plants examinés pour leur développement racinaire, 12 plants présentent des racines adventives pour le récipient *45-340*, 14 pour le *25-350A* et 11 pour le *1-350A* à 1,5 cm. Ces valeurs sont identiques (p=0,5720) selon l'analyse statistique. Le nombre de racines adventives développées par plant est équivalent (p=0,4719) pour les trois types de récipients (Figure 30). En moyenne, on obtient 2,4 racines adventives pour le *45-340*, 3,5 pour le *25-350A* et 2,5 pour le *1-350A* à 1,5 cm. La distribution de ces racines sur le plan horizontal (360°) est semblable (p=0,3924) pour les trois traitements. Les 16 plants de chaque traitement sont répartis assez uniformément dans la plupart des classes (1,0 – 5,0). Des exemples de



Pour chaque date de récolte, les moyennes identifiées par des lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

Figure 28

Bilan de croissance à la cinquième année dans la plantation (1999) - dispositif P94.4
Chêne rouge

- Plantations à St-Germain-de-Grantham (N 45° 52' 33,1", W 72° 35' 05");
- Peuplement d'origine : terre agricole abandonnée depuis 2 à 3 ans;
- Zone écologique : érablière à Tilleul;
- Préparation de terrain : labourage et hersage agricole avec pose de paillis en longueur;
- Outil de mise en terre : pelle;
- Densité de reboisement : 3,5 m x 2,0 m;
- Protection annuelle contre les petits rongeurs et les chevreuils.

Figure 28

Plant de Chêne rouge (dispositif P94.4 – recipient *1-1050A*) à la cinquième année (1999) de plantation

Tableau 7.

Concentrations en éléments minéraux des plants des dispositifs P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge à la cinquième année de plantation

Dispositif	Traitement	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
P94.3 Boj	*45-340*	2,29 a	0,22 a	1,08 a	1,21 a	0,18 a	0,01 a
	25-350A	2,17 a	0,22 a	1,04 a	1,40 a	0,19 a	0,00 a
	1-350A à 1,5 cm	2,25 a	0,23 a	1,08 a	1,32 a	0,19 a	0,01 a
P94.3 Chr	*28-340*	1,85 a	0,14 a	0,67 a	0,83 a	0,19 a	0,00 a
	25-350A	2,02 a	0,14 a	0,66 a	0,96 a	0,19 a	0,00 a
	1-350A à 3,0 cm	1,99 a	0,14 a	0,73 a	0,86 a	0,19 a	0,01 a
P94.4 Chr	*12-1000*	2,06 a	0,15 a	0,70 a	0,91 a	0,20 a	0,01 a
	1-1050A à 3,0 cm	2,07 a	0,15 a	0,74 a	0,91 a	0,20 a	0,01 a

Verticalement, pour chaque dispositif, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

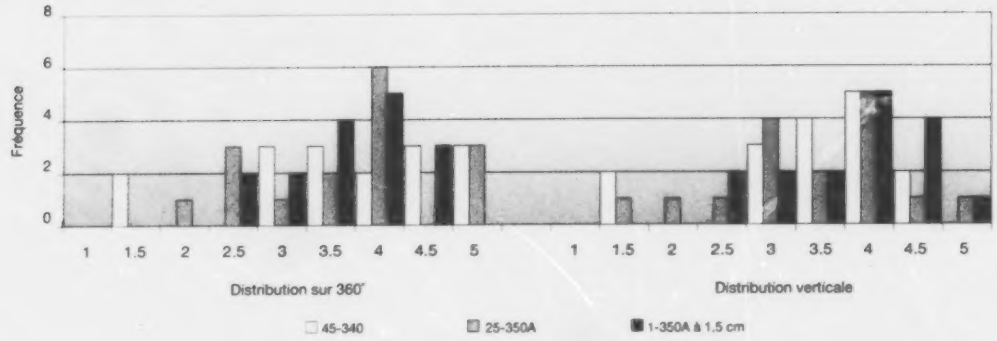
Les récoltes ont été effectuées le 99-06-(14, 15 et 21) pour les dispositifs P94.3 Chr, P94.4 Chr et P94.3 Boj.

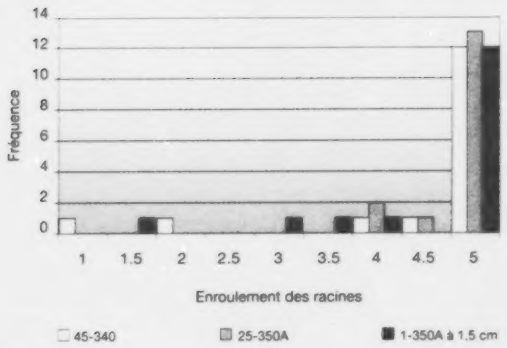
Tableau 8.

Analyse des systèmes racinaires des semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21)

Traitement	Nombre de racines hors de la carotte d'origine
45-340	16,2 a
25-350A	13,7 a
1-350A à 1,5 cm	14,8 a

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.





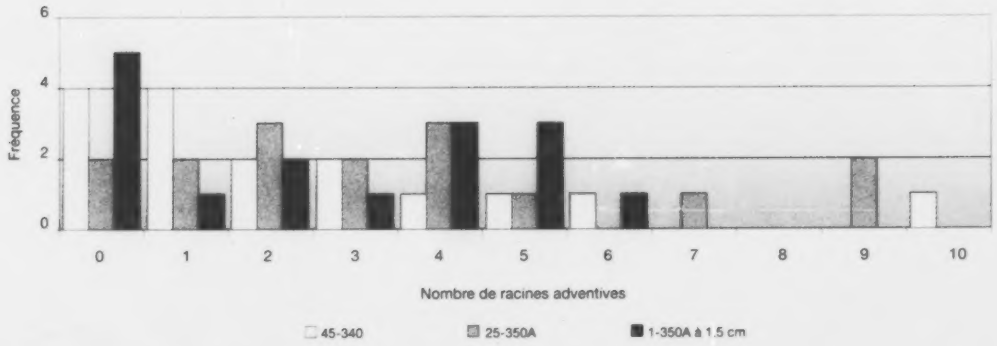


Figure 30.

Développement racinaire de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21)

développement racinaire à la cinquième saison de plantation sont présentés à la figure 31.

L'analyse à l'aide du test de Kruskal-Wallis modifié indique qu'il y a une différence significative (p=0,0432) entre les récipients pour la persistance de la carotte initiale. Toutefois, les comparaisons deux à deux à l'aide de la méthode de Bonferroni ($\alpha/3$=0,0166) n'ont pas fait ressortir de différences significatives. Cependant, si le seuil global (α) retenu avait été de 6,3 %, on aurait obtenu des différences significatives entre le *25-350A* et le *45-340*. Les plants produits dans le récipient *25-350A* présenteraient alors une persistance moindre de la carotte d'origine. La figure 32 présente trois exemples de persistance de la carotte d'origine pour le Bouleau jaune. Pour les autres paramètres analysés (enchevêtrement des racines, déformations à la base de la carotte et écoulement de sève), on ne note aucune différence (p=0,0926, p=0,2209 et p=1,0000). Pour l'enchevêtrement des racines, les plants produits dans le *1-350A* sont répartis dans toutes les classes. Pour le *25-350A*, les plants sont principalement répartis dans les classes supérieures tandis que l'on retrouve les plants dans les classes inférieures pour le *45-340*. Pour les déformations à la base de la carotte, on retrouve pour chaque traitement des plants dans toutes les classes avec une dominance dans les classes extrêmes. Des écoulements de sève ont été observés sur un ou deux plants par traitement.

4.3.2 Plants de Bouleau jaune naturellement établis

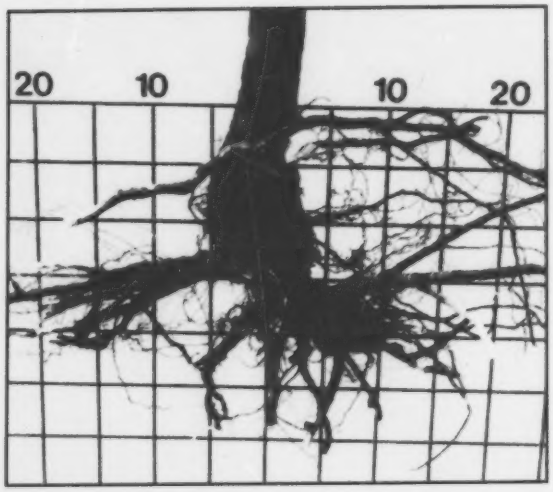
Le tableau 9 présente les caractéristiques morphologiques et les concentrations en minéraux dans les tissus (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse) des plants de Bouleau jaune régénérés naturellement récoltés pour l'étude de leur système racinaire. Les plants, âgés en moyenne de 15 ans ont une hauteur de 258 cm et un diamètre au collet de 34,1 mm. Contrairement aux plants de nos expériences, les plants naturels croissaient en sous-étage d'un peuplement mûr (érablière à Bouleau jaune). La hauteur des plants est comparable à celle du dispositif P94.3 Bouleau jaune (Figure 24) à l'exception du diamètre qui est plus faible. La concentration en azote des plants naturels est légèrement plus élevée que celle des semis du dispositif P94.3 Bouleau jaune (Tableau 7). On observe la tendance inverse pour le phosphore et le potassium.

Les plants de Bouleau jaune naturels ont développé en moyenne dix-sept racines latérales de premier ordre qui se sont généralement formées le long de la racine principale (pivot). Ces racines sont presque toutes de fort diamètre. Sur le plan horizontal (360°), ces racines sont très bien réparties dans le sol. En effet, on compte plus de 93 % des plants dans les classes supérieures (3,0 [3 plants], 3,5 [2 plants], 4,0 [1 plant], 4,5 [5 plants] et 5,0 [4 plants]). La distribution verticale des racines dans le sol est également très bonne. Cent pour cent des racines sont dans les classes 3,0 ou plus (3,0 [4 plants], 3,5 [4 plants], 4,0 [5 plants], 4,5 [1 plant] et 5,0 [2 plants]). L'enchevêtrement des racines est peu observé pour les plants naturels (3,0 [2 plants], 3,5 [2 plants], 4,0 [2 plants], 4,5 [8 plants] et 5,0 [2 plants]). Comme cela a été mentionné pour l'Épinette noire (Section 3.1.2) et l'Épinette blanche (Section 3.1.5) régénérées naturellement, les caractéristiques physico-chimiques du sol (texture, obstacles, drainage, minéraux, ...) déterminent fortement l'architecture des racines. L'écoulement de sève n'a été noté que pour un seul des seize plants. Des exemples de développement racinaire de plants naturels de Bouleau jaune sont présentés à la figure 33.

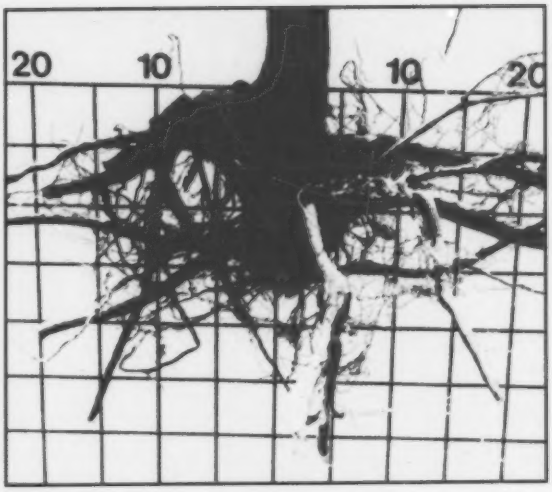
4.3.3 P94.3 Chêne rouge

Les plants cultivés dans le récipient *28-340* ont produit 26,9 racines > 1,0 cm qui se sont développées à partir de la carotte d'origine (Tableau 10). Ce nombre est de 22,9 pour le *25-350A* et de 25,0 pour le *1-350A* à 3,0 cm. Les analyses statistiques n'ont pas permis de faire ressortir des différences (α=0,05) entre les traitements. Au seuil α=0,05, on n'observe pas de différence significative (p=0,0889) entre les trois types de récipients pour la distribution sur 360°. Si toutefois, le seuil avait été fixé à 10 %, les plants produits dans le récipient *28-340* auraient eu une distribution des racines sur 360° plus faible (Figure 34). La distribution des racines sur le plan vertical est semblable (p=0,0621) entre les trois récipients. Néanmoins, à un seuil de 10 %, on aurait observé des différences entre les traitements. La distribution verticale des racines aurait été inférieure pour les plants produits dans le *28-340*. L'enroulement des racines n'a pratiquement pas été observé et aucune différence (p=0,8471) n'a été notée entre les trois récipients (Figure 34). Plus de 80 % des plants de chaque traitement ne présentaient aucun enroulement.

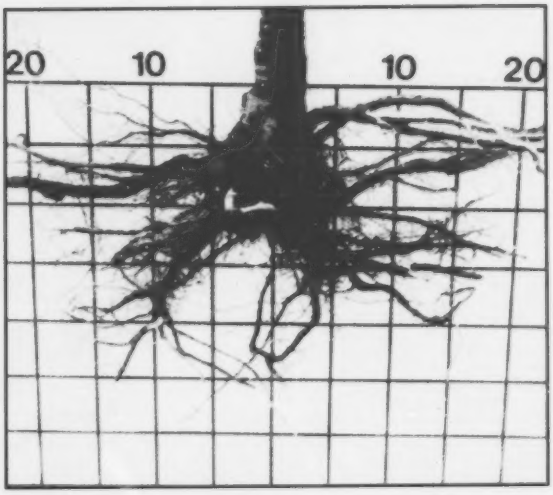
Seulement quelques plants (*28-340* [3 plants], *25-350A* [2 plants] et *1-350A* à 3,0 cm [3 plants]) ont développé des racines adventives. L'analyse statistique a démontré qu'il n'y a aucune différence (p=1,0000) entre les traitements. Le nombre moyen de racines adventives par plant est faible (Figure 34) et est comparable (p=0,8104) entre les trois types de récipients. On obtient en moyenne 0,2 racine adventive par plant pour le



45-340



25-350A

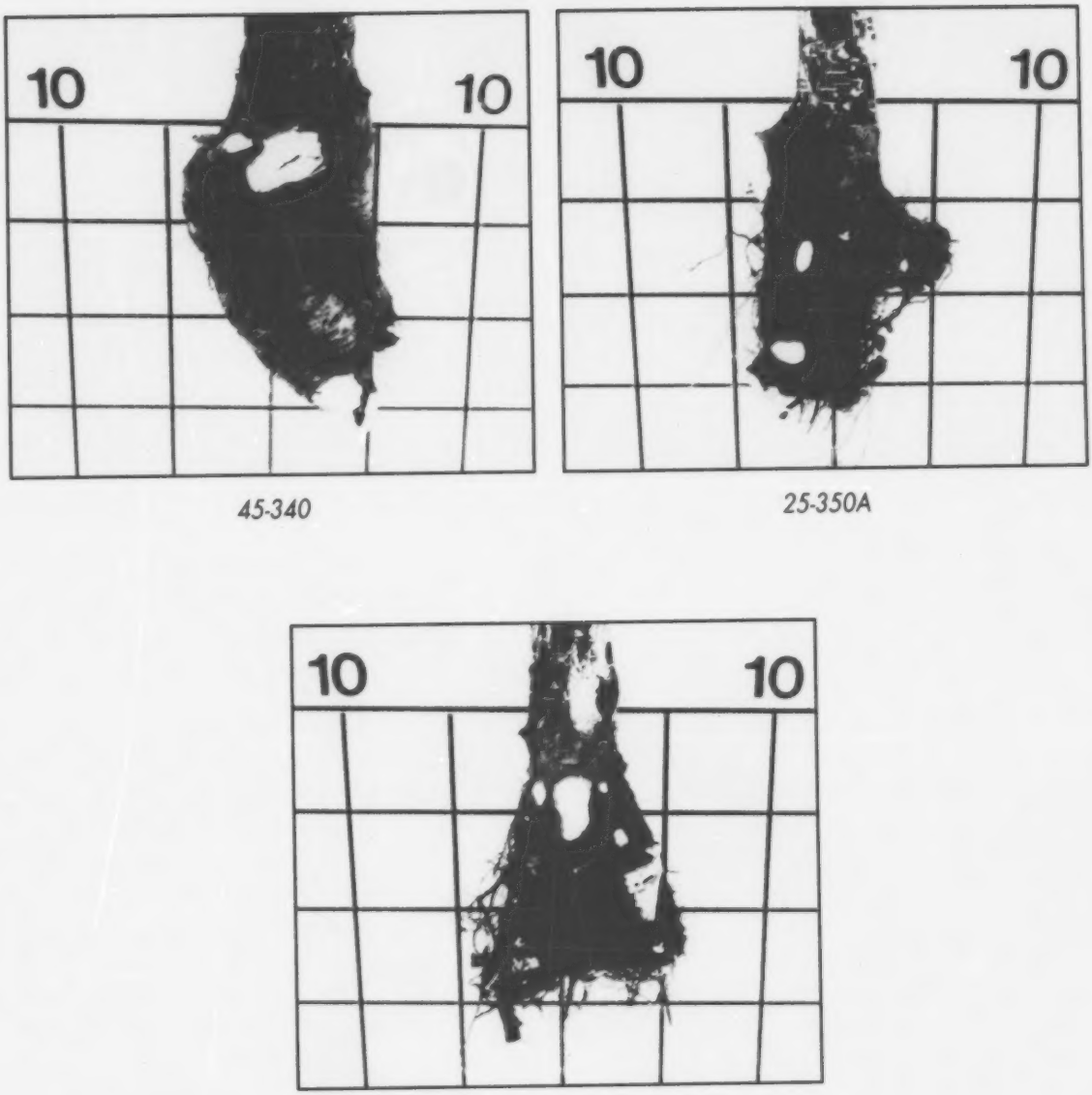


1-350A à 1,5 cm

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 31.

Exemples de développement racinaire de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21)



45-340

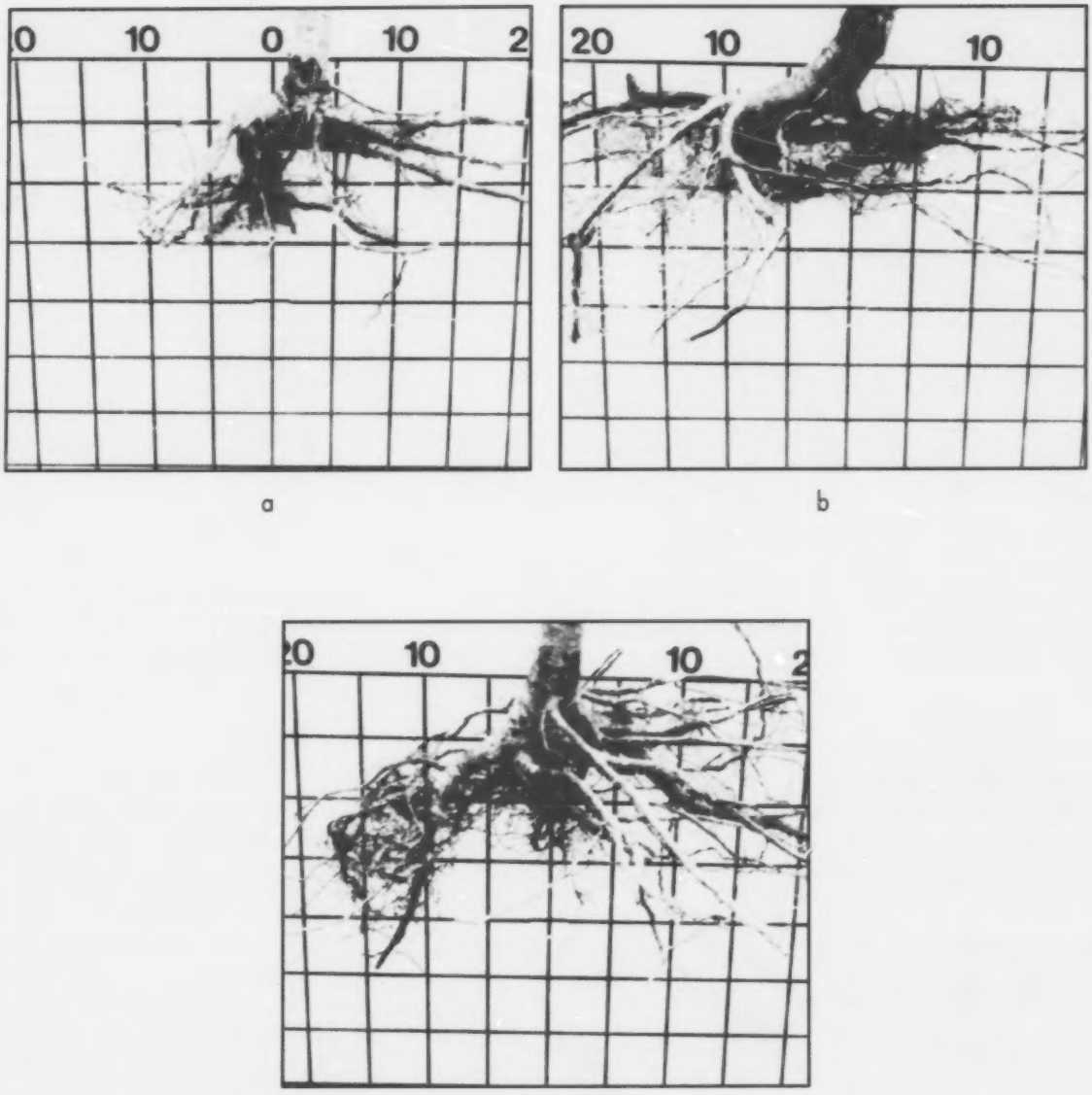
25-350A

1-350A à 1,5 cm

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 32

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Bouleau jaune cultivés dans les récipients *45-340*, *25-350A* et *1-350A* à 1,5 cm à la cinquième année de plantation (99/06/21)



Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 33.

Exemples de développement racinaire de plants de Bouleau jaune régénérés naturellement (99/07/07)

Tableau 9.

Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis de Bouleau jaune régénérés naturellement

Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	H/D	Âge	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
258	34,1	7,6	15	2,67	0,17	0,90	0,62	0,23	0,28

Moyennes effectuées sur 16 plants pour les analyses morphologiques et sur trois échantillons composites pour les concentrations en éléments minéraux dans les tissus.

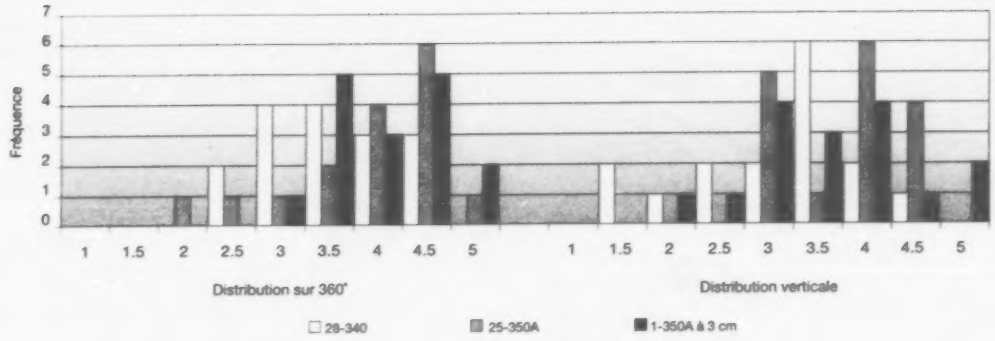
Récolte effectuée le 99-07-07.

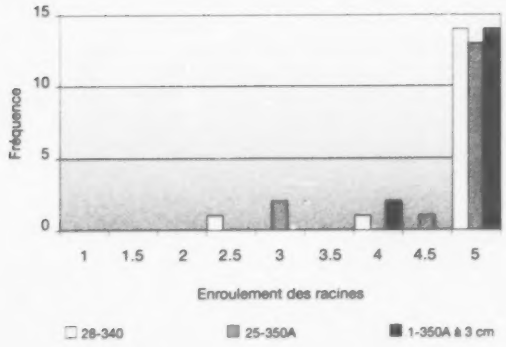
Tableau 10.

Analyse des systèmes racinaires des semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)

Traitement	Nombre de racines hors de la carotte d'origine
28-340	26,9 a
25-350A	22,9 a
1-350A à 3,0 cm	25,0 a

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.





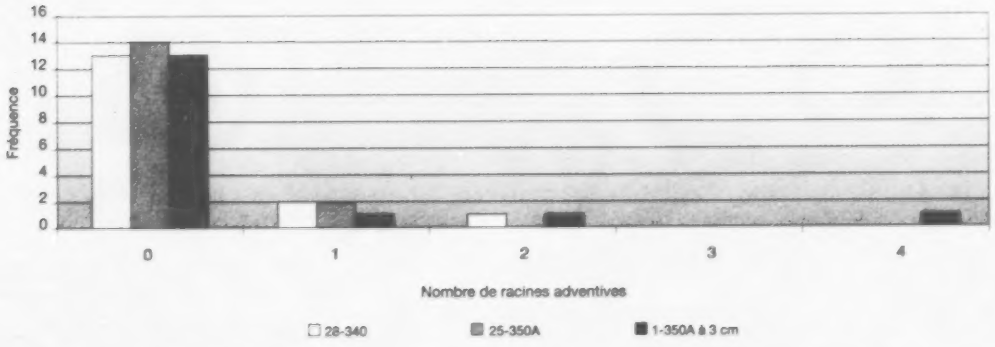


Figure 34.

Développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)

28-340, 0,1 pour le *25-350A* et 0,4 pour le *1-350A* à 3,0 cm (Figure 34). La distribution des racines sur 360° pour les plants qui en possèdent est très faible et elle est semblable (p=0,5060) pour les trois traitements. Des exemples de développement racinaire sont présentés à la figure 35. Sur la photographie du *28-340*, on peut observer que le bris de la radicule à l'ensemencement (pour assurer la cohésion de la carotte) a favorisé le développement de plusieurs pivots ou racines principales.

On obtient des différences significatives (p=0,0164 – test de Kruskal-Wallis) entre les traitements pour la persistance de la carotte d'origine. L'analyse deux à deux réalisée avec le test de Bonferroni (α/3=0,0166) fait ressortir des différences (p=0,0115) entre le *28-340* et le *25-350A*. La persistance de la carotte d'origine est plus marquée pour les plants cultivés dans le récipient *28-340* (Figure 36). À un seuil global α=0,06, des différences significatives seraient également apparues entre le *28-340* et le *1-350A* à 3,0 cm. L'enchevêtrement des racines est semblable (p=0,7551) pour les trois traitements. Les plants sont bien répartis dans toutes les classes avec toutefois des valeurs plus élevées aux classes 2,0 et 4,0. Des déformations importantes à la base de la carotte sont notées sur les plants produits dans le récipient *28-340*. On note des différences significatives (α/3=0,0166) entre le *28-340* et le *25-350A* (p=0,0007) et entre le *28-340* et le *1-350A* à 3,0 cm (p=0,0017). De l'écoulement de sève a été noté sur près de 25 % des plants (*28-340* [4 plants], *25-350A* [4 plants] et *1-350A* à 3,0 cm [3 plants]) sans que l'on observe de différence (p=1,0000) entre les traitements.

4.3.4 P94.4 Chêne rouge

À la cinquième saison de plantation, les semis de Chêne rouge produits dans des récipients de fort volume (≥ 1 L) ont produit un nombre identique (α=0,05) de nouvelles racines hors de la carotte d'origine. On compte 33 racines > 1,0 cm hors de la carotte d'origine pour chacun des deux traitements (Tableau 11). La distribution des nouvelles racines > 1,0 cm sur 360° est semblable (p=0,4173) pour les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm (Figure 37). La répartition des racines sur le plan horizontal est bonne car plus de 90 % des plants se situent dans les classes 3,5 ou plus. La distribution verticale des racines est identique (p=1,0000) entre les deux types de récipients. Les plants sont répartis assez uniformément dans les classes 2,0 à 5,0. La distribution des racines sur le plan vertical est légèrement inférieure à celle sur 360°. L'enroulement des racines est pratiquement nul et il est comparable (p=0,9520) pour les deux traitements (Figure 37). Pour les deux types de récipients, on dénombre onze des douze plants pour lesquels l'enroulement des racines est nul.

On a noté la présence de racines adventives sur quelques plants sans qu'il n'y ait de différences (p=0,5900) entre les deux traitements. Pour le *12-1000*, trois plants ont développé des racines adventives contre un seul pour le *1-1050A* à 3,0 cm (Figure 37). Le nombre moyen de racines adventives par plant est similaire (p=0,2298). On compte 0,7 racine adventive pour le *12-1000* contre 0,1 pour le *1-1050A*. Pour les quelques plants qui ont développé des racines adventives, la distribution de celles-ci sur le plan horizontal (360°) est très faible et elle est semblable (p=0,2298) entre les deux traitements. La figure 38 présente un exemple de développement racinaire pour le *12-1000* et le *1-1050A* à 3,0 cm. On peut observer sur ces photographies la présence de quelques pivots. Ceci est le résultat du bris volontaire de la radicule à l'ensemencement lors de la culture dans la pépinière.

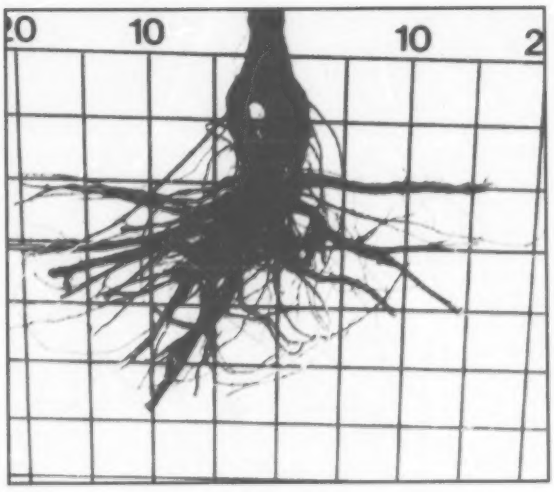
Pour les quatre autres paramètres évalués (persistance de la carotte d'origine, enchevêtrement des racines, déformations à la base de la carotte et écoulement de sève), on ne décèle aucune différence significative (p=0,5161, p=0,7031, p=0,3528 et p=0,6670). La persistance de la carotte d'origine est importante (Figure 39). On retrouve au moins 75 % des plants dans les classes inférieures (1,0 à 2,5). Pour l'enchevêtrement des racines, on a une répartition assez uniforme des plants dans la plupart des classes avec une dominance pour les classes inférieures (≤ 2,5). Les déformations à la base de la carotte sont importantes pour les deux récipients. On retrouve pas moins de 75 % des plants dans les classes 1,0, 1,5 et 2,0. De l'écoulement de sève a été constaté sur trois plants (douze plants observés par traitement) pour le *12-1000* et sur cinq plants pour le *1-1050A* à 3,0 cm.

4.3.5 Plants de Chêne rouge naturellement établis

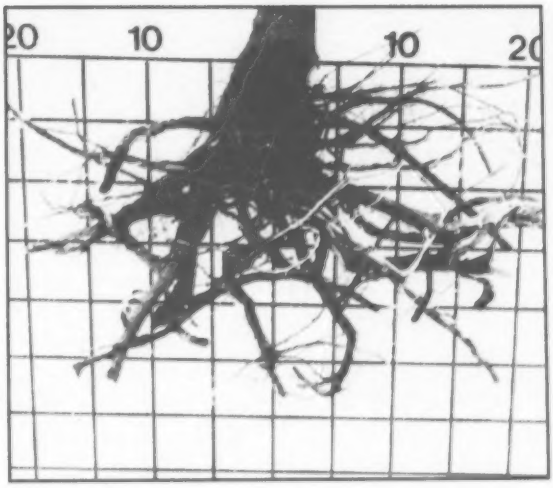
Les caractéristiques morphologiques et les concentrations en minéraux des plants naturels de Chêne rouge récoltés pour l'analyse de l'architecture de leurs systèmes racinaires sont présentés au tableau 12. Les plants, âgés en moyenne de seize ans, ont une hauteur de 240 cm avec un diamètre au collet de 25,7 mm. Ces plants ont une hauteur supérieure à ceux des dispositifs expérimentaux (Figures 26 et 28) et un diamètre comparable pour un rapport H/D supérieur. Comme pour les plants naturels de Bouleau jaune, les plants de Chêne rouge croissaient en sous-étage d'un peuplement mûr

(Érablière à feuillus d'ombre). Les concentrations en azote, phosphore et potassium sont comparables à celles mesurées dans nos expériences (Tableau 7).

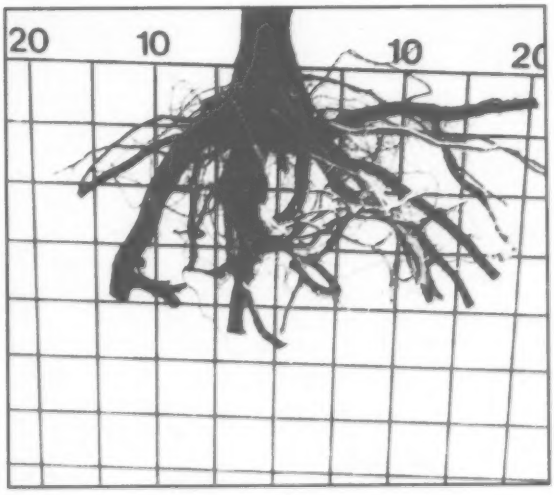
Les plants naturels de Chêne rouge ont développé en moyenne 54 racines latérales de premier ordre le long du pivot (racine principale). Ces racines sont pour la plupart de fort diamètre. Les distributions sur les plans vertical (360°) et horizontal sont très bonnes. On retrouve 87,5 % des plants dans les classes supérieures (3,5 [2 plants], 4,0 [7 plants], 4,5 [4 plants] et 5,0 [1 plant]) pour la distribution sur 360° et 100 % pour la distribution verticale (3,5 [1 plant], 4,0 [8 plants], 4,5 [6 plants] et 5,0 [1 plant]). L'enchevêtrement des racines est peu présent. En effet, on compte 87,5 % des plants dans les classes supérieures (3,5 [2 plants], 4,0 [3 plants], 4,5 [3 plants] et 5,0 [6 plants]). La croissance des racines est fortement déterminée par les caractéristiques physico-chimiques du sol. La figure 40 présente quelques exemples de développement racinaire de plants de Chêne rouge régénérés naturellement. De l'écoulement de sève a été observé sur six des seize plants observés.



28-340



25-350A

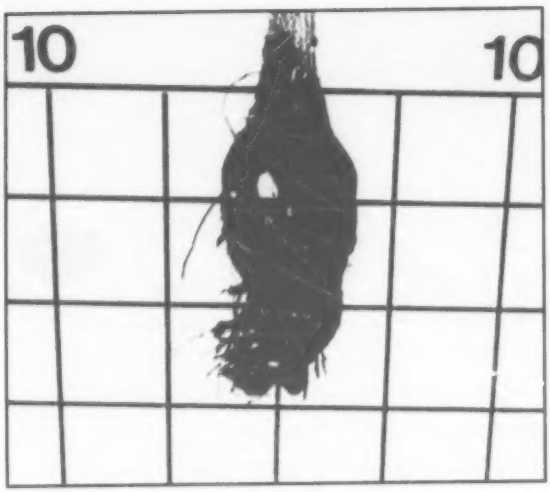


1-350A à 3,0 cm

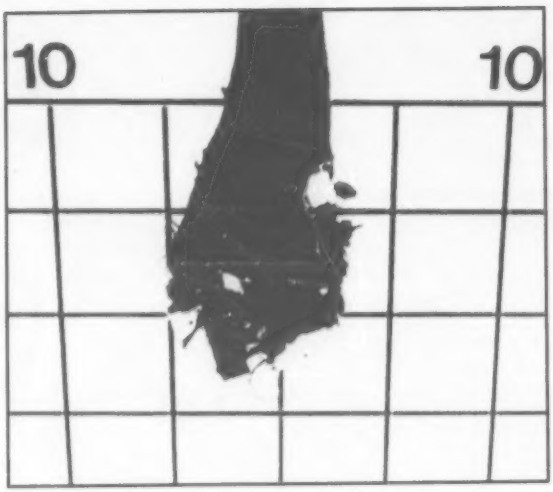
Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 35.

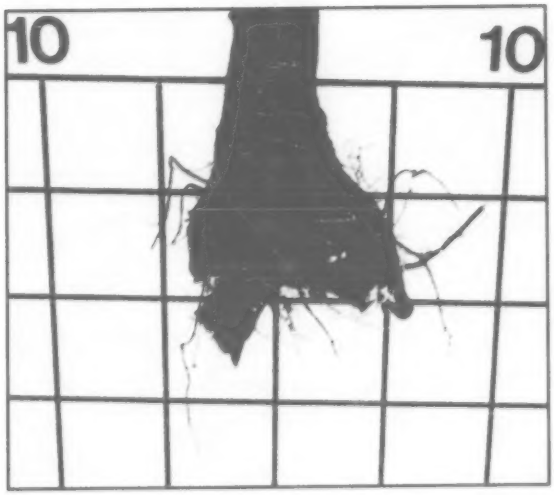
Exemples de développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)



28-340



25-350A



1-350A à 3,0 cm

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 38.

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Chêne rouge cultivés dans les recipients *28-340*, *25-350A* et *1-350A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/14)

Tableau 11.

Analyse des systèmes racinaires des semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15)

Traitement	Nombre de racines hors de la carotte d'origine
12-1000	33,1 a
1-1050A à 3,0 cm	32,9 a

Verticalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil $\alpha = 0,05$ selon le test de Tukey.

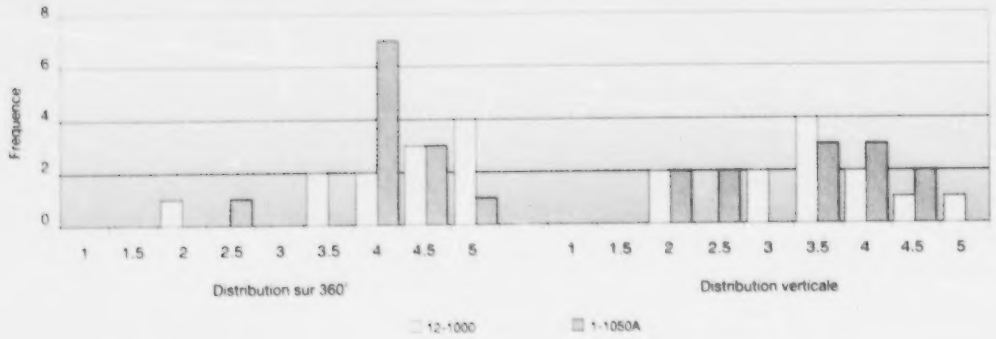
Tableau 12.

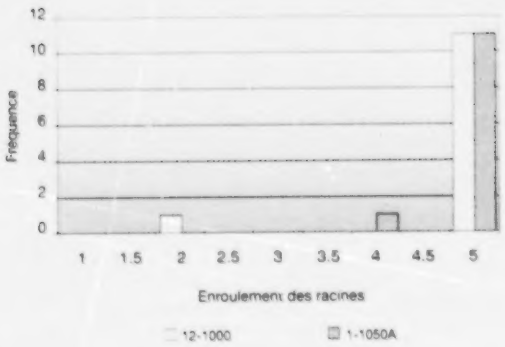
Caractéristiques morphologiques et physiologiques de semis de Chêne rouge régénérés naturellement

Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	H/D	Âge	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Mn (%)
240	25,7	9,3	16	1,98	0,17	0,63	0,60	0,19	0,07

Moyennes effectuées sur seize plants pour les analyses morphologiques et sur trois échantillons composites pour les concentrations en éléments minéraux dans les tissus.

Récolte effectuée le 99-06-29.





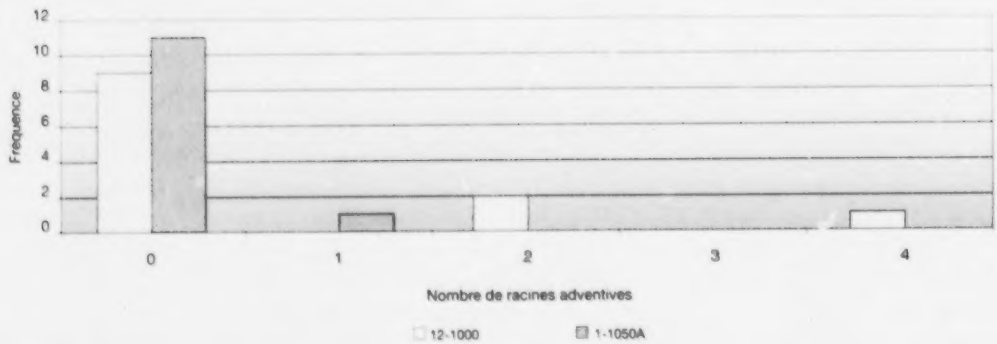
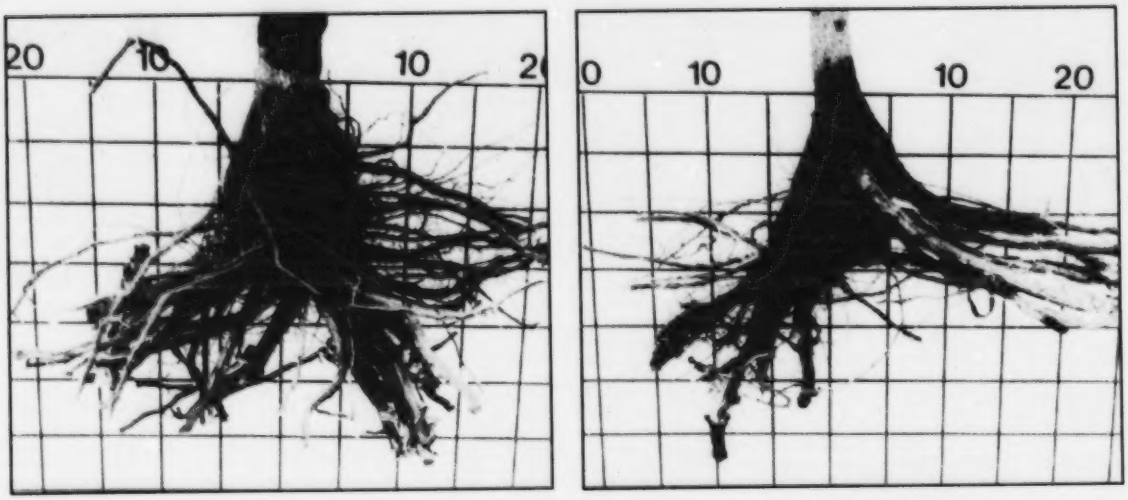


Figure 37

Developpement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15)

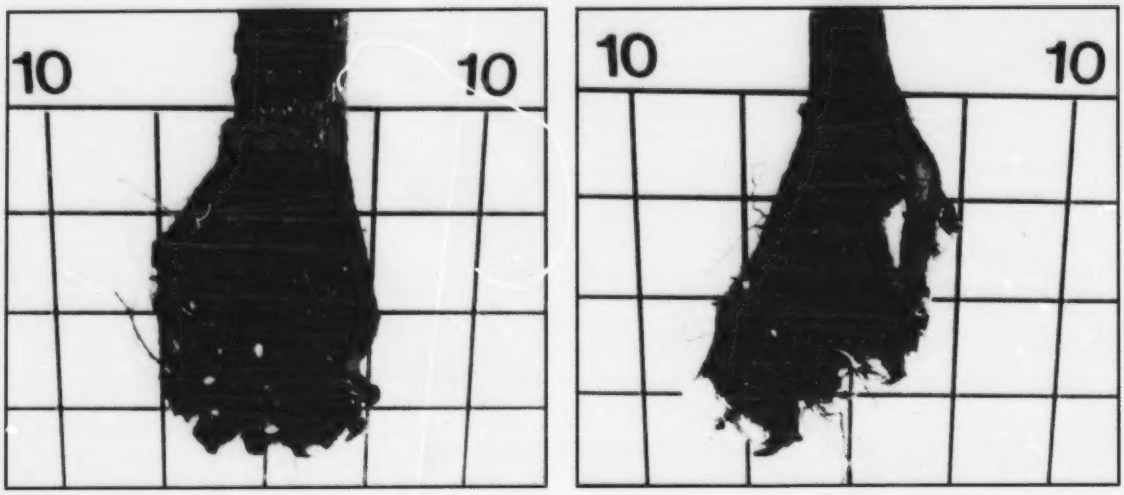


12-1000 *1-1050A* à 3,0 cm

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 38

Exemples de développement racinaire de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15)

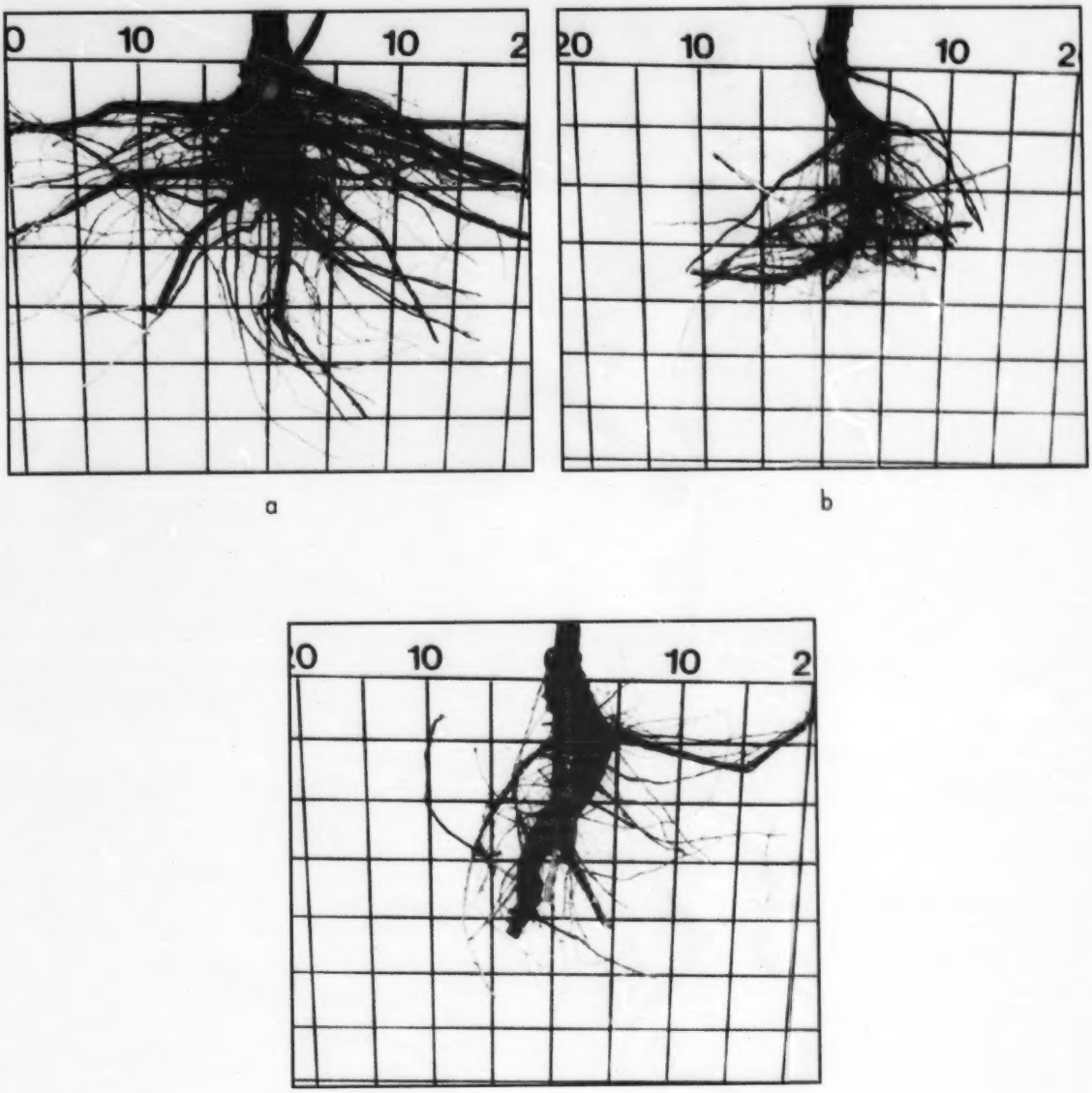


12-1000 *1-1050A* à 3,0 cm

Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 39.

Exemples de persistance de la carotte d'origine de semis de Chêne rouge cultivés dans les récipients *12-1000* et *1-1050A* à 3,0 cm à la cinquième année de plantation (99/06/15)



Échelle : 1 carré = 5 cm x 5 cm

Figure 40.

Exemples de développement racinaire de plants de Chêne rouge régénérés naturellement (99/06/29)

Chapitre cinq

Discussion

5.1 Plantations résineuses

Les expériences réalisées dans les quatre plantations comparatives établies en 1994 et 1995 avec l'Épinette noire et l'Épinette blanche n'ont pas permis de faire ressortir de différences significatives entre les différents modèles de récipients évalués pour le taux de survie des plants. Dans presque tous les cas, la carie des racines causée par l'Armillaire est responsable de la mortalité des plants. Le bilan morphologique à la fin de la cinquième année n'a fait ressortir qu'une seule différence significative pour la hauteur (P93.1 Épinette noire) et aucune pour le diamètre au collet entre les différents traitements. La seule différence de hauteur est minime et ne concerne que le récipient *1-360A* à 1,0 et 2,0 cm. Ces derniers ne sont toutefois pas différents du témoin (*15-320*). Durant les premières années en plantations, le plant cherche à rétablir son équilibre (rapport H/D) qui est atteint à la fin de la troisième saison de croissance. Les résultats obtenus dans nos expériences sont en accord avec les observations faites par plusieurs auteurs (DELEPORTE 1982, GRENE 1978a, 1978b, GILMAN et KANE 1990, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994) qui mentionnent que les effets négatifs des malformations racinaires ne se font guère sentir durant la première décennie en plantations. Une synthèse des analyses statistiques effectuées à la cinquième année est présentée à la figure 41.

Bien que l'on ne puisse pas comparer directement le *25-350A* au récipient à parois pleines *15-320* (dispositifs expérimentaux distincts), on peut toutefois supposer très fortement que les résultats auraient été semblables entre le *25-350A* et le *1-360A*. En effet, le *25-350A* présente un dessin de ses cavités identique à celui du *1-360A* à l'exception du rétrécissement à la base des cavités qui a été éliminé.

Si l'on compare la performance des plants de nos dispositifs expérimentaux avec le rendement des plantations à grande échelle de la région du Bas-Saint-Laurent (LABRECQUE 2000) établies avec des plants cultivés dans le récipient *45-340*, on obtient des pourcentages de survie et des hauteurs supérieurs pour l'Épinette noire (région 01 : 89 % et 111 cm). L'Épinette blanche présente des résultats comparables (région 01 : 96 % et 107 cm) pour la plantation établie en 1994 (P93.1) et un taux de survie inférieur pour les plantations de 1995 (P94.1 et P94.2). Cette comparaison, bien que non valable au point de vue statistique, est intéressante parce que les plantations de la région 01 ont été établies selon les méthodes classiques de mise en terre des plants, différentes de celles utilisées sur nos sites expérimentaux. Les résultats de croissance moyenne en hauteur par année obtenus avec l'Épinette noire durant les trois premières saisons (14,7 cm) sont inférieurs à ceux obtenus par JOBIDON *et al.* (1998) dans une plantation située également près du village de Biencourt. Pour la croissance en diamètre, les valeurs moyennes obtenues (4,14 mm) dans nos dispositifs sont supérieures à celles du site avec végétation compétitive et inférieures à celles du site sans végétation compétitive de JOBIDON *et al.* (1998).

L'analyse des concentrations en minéraux dans les tissus n'a fait ressortir des différences significatives que pour l'azote dans les plantations d'Épinette blanche établies en 1995. Il est toutefois difficile de porter un jugement adéquat sur ces différences puisque nous ne possédons pas de standards précis pour les teneurs en azote dans les plantations. Si l'on reporte toutefois ces écarts (0,06 % et 0,13 %) aux standards connus pour la culture de plants en pépinières, on peut considérer ces différences comme étant faibles. Pour l'Épinette noire, les concentrations en minéraux sont égales ou supérieures à celles de plants naturellement établis de dimensions comparables mais d'âges différents. L'Épinette blanche montre des valeurs plus faibles en azote et en phosphore avec les plants du dispositif établi en 1993 tandis que c'est l'inverse pour les plantations de 1994.

Les analyses statistiques effectuées sur les variables associées à l'architecture des racines n'ont fait ressortir que peu de différences significatives entre les différents traitements. Contrairement aux analyses effectuées pour le taux de survie et les variables morphologiques, peu de plants (16 ou 24) ont été utilisés pour les observations qualitatives et les mesures

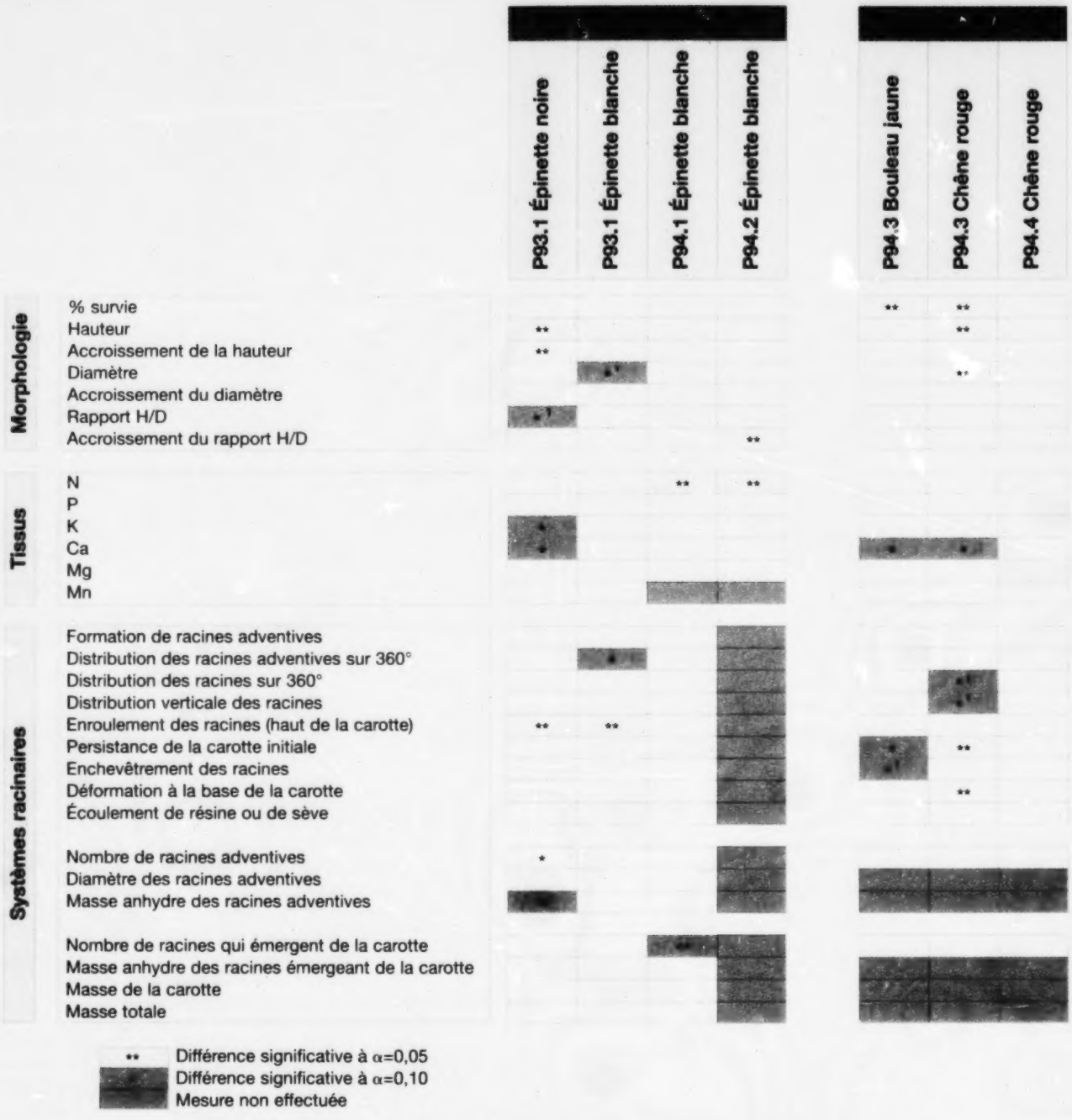


Figure 41.

Résumé des analyses statistiques à la cinquième année dans les plantations

quantitatives des systèmes racinaires. Comme le mentionnent DEBLOIS (1999) et SAVARD (1999), l'interprétation des analyses statistiques des systèmes racinaires doit être faite en prenant en compte la faible taille de l'échantillon. L'absence de différences significatives entre les récipients peut être due à un manque de puissance des tests. En conséquence, il est possible qu'il existe certaines différences, mais que l'analyse soit incapable de les détecter.

Pour les dispositifs (P93.1 Épinette noire et P93.1 Épinette blanche) où l'on comparait des récipients à parois ajourées à des récipients à parois pleines, des différences significatives ont été observées pour l'enroulement des racines dans le haut de la carotte. La forme circulaire des cavités du *15-320*, contrairement à la forme carrée du *1-360A*, explique ce phénomène. L'usage de récipients avec des cavités à section carrée, tel le *25-350A* qui est actuellement utilisé sur une base opérationnelle pour la production de plants de fortes dimensions, élimine ce problème. Les plants des deux essences ont démontré une bonne capacité à former des racines adventives. Le développement de ces racines a été toutefois plus important dans les cavités circulaires (*15-320*) pour l'Épinette noire. L'accumulation des glucides au-dessus de la zone d'étranglement pourrait avoir stimulé la formation des racines adventives (HAASE *et al.* 1993, PREISIG *et al.* 1979).

L'analyse des variables qualitatives de distribution des racines (sur 360° et verticale) et quantitatives (dénombrement) n'a pas permis de faire ressortir des avantages à l'utilisation d'un récipient à parois ajourées. De plus, l'examen des variables démontre que l'architecture des nouvelles racines formées en plantations est bonne. L'utilisation d'un dessin de récipient (*1-350A*) aux caractéristiques améliorées (angle des pointes, ... voir Annexe 1) n'a pas permis d'améliorer l'architecture des racines en plantation, même s'il semblait présenter des avantages certains lors de la culture en pépinière.

L'examen des systèmes racinaires montre que dans presque tous les cas, la carotte d'origine est encore très visible et qu'elle présente des malformations racinaires importantes (enchevêtrement des racines, déformations à la base de la carotte, ...). L'utilisation de récipients, comme le *1-350A* ou le *25-350A* qui ont un fond de cavité ouvert sans rétrécissement à la base, permet d'éliminer complètement le problème des déformations à la base de la carotte. On observe, à l'aide de coupes transversales effectuées dans certains systèmes racinaires, que la croissance des racines semble commencer à occulter les malformations et que certaines racines commencent à se souder. Comme le mentionnent GILLGREN (1975) et PERSSON (1982), les racines déformées se recouvrent avec un grain de bois parallèle et reprennent une apparence plus normale. La persistance ou non de la carotte d'origine demeure toutefois, à ce stade-ci, une inconnue. Il est toutefois permis de croire que dans quelques années, la forme de la carotte d'origine aura complètement disparu.

Si l'on exclut la présence de la carotte d'origine, les systèmes racinaires sont maintenant constitués principalement de plusieurs racines de diamètre moyen à élevé dont certaines sont adventives. On observe également la présence d'un chevelu constitué de racines fines près de la carotte d'origine. Les semis mis en terre comptent plus de racines latérales que les plants naturels. Ces résultats vont à l'encontre de ceux de HALTER et CHANWAY (1993) avec le Sapin de Douglas et le Pin lodgepole et de HALTER *et al.* (1993) avec le Pin tordu. Dans quelques années, il est fort probable qu'un pourcentage élevé du matériel (75 à 80 %) du système racinaire sera probablement contenu, en moyenne, dans les trois à cinq plus grosses racines (COUTTS 1983, COUTTS *et al.* 1990). L'architecture de base d'un système racinaire peut être déterminée durant les premières années de plantation (BURDETT *et al.* 1986). Les travaux sur l'Épinette de Sitka (COUTTS 1983, COUTTS et LEWIS 1983) ont démontré que les différences entre les racines principales larges et les plus petites formées durant les premières années de plantation se sont maintenues tout au long de leurs 34 premières années de croissance. Selon COUTTS (1983), plus le nombre de racines de support est faible, plus la stabilité de la structure devient sensible à sa symétrie.

Globalement, l'ensemble des résultats obtenus avec les conifères va à l'encontre de notre hypothèse de départ : « les semis de conifère produits dans des récipients à parois ajourées possèdent une structure racinaire plus horizontale et moins déformée qui permet aux semis d'avoir en plantations une distribution des racines, un taux de survie, une croissance et une stabilité supérieurs aux plants produits dans des récipients à parois pleines ». Il est actuellement trop tôt pour évaluer la stabilité des plants. Néanmoins, en fonction de la qualité du développement racinaire et de la formation de racines adventives, il est très peu probable que les plants présentent des problèmes de stabilité ou des défauts de forme à la base du tronc.

5.2 Plantations feuillues

Contrairement à ce qui a été observé pour les conifères (Chapitre 3), des différences significatives entre les récipients à parois pleines et ceux à parois ajourées ont été observées pour le taux de survie et les variables morphologiques. L'examen des résultats obtenus à la fin de la cinquième année de croissance indique que le meilleur rendement (taux de survie) pour les semis de Bouleau jaune est obtenu avec les récipients *45-340* et *25-350A*. L'utilisation de récipients à parois ajourées ne permet pas d'améliorer le rendement des plants de Bouleau jaune, principalement pour le *1-350A*. Pour le Chêne rouge cultivé dans les récipients de 350 cm^3, la meilleure performance a été réalisée par les plants cultivés dans le *25-350A*. En effet, le taux de survie, la hauteur et le diamètre à la fin de la cinquième saison étaient supérieurs dans le récipient à parois ajourées *25-350A*. Le récipient *1-350A* ne présente pas, à ce stade-ci, des avantages par rapport au *25-350A*. Les plants de Chêne rouge cultivés dans des récipients de fort volume (≥ 1 L) présentent un bilan identique entre le récipient témoin (*12-1000*) et celui à parois ajourées (*1-1050A*). Les feuillus, à l'image de ce qui a été observé pour les conifères, rétablissent leur équilibre hauteur/diamètre durant les premières saisons. À la fin de la deuxième année, le rapport H/D s'est stabilisé. Un résumé des analyses statistiques effectuées à la cinquième année de plantation est présenté à la figure 41.

Les faibles taux de survie (56,7 % à 87,5 %) mesurés dans ces trois plantations peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. La mauvaise qualité du site (sol lourd, mauvais drainage, ...) a créé des conditions difficiles, principalement pour le Chêne rouge. À titre d'exemple, presque tous les plants des trois traitements du bloc 7 sont morts. De plus, à l'été 1996, des plants en croissance (16 par traitement) ont été déterrés pour l'analyse de leur système racinaire et remis en terre aussitôt. Tous ces plants sont morts peu de temps après et représentent entre 6,7 et 7,1 % de la mortalité totale. De plus, l'effet combiné du paillis de plastique noir et des coupes de dégagement ont certainement favorisé une augmentation substantielle (non évaluée) de la température du sol au niveau de la rhizosphère. Finalement, des traces de brûlures (insolation) ont été observées sur certains plants. L'usage de paillis individuels en carton aurait certainement été préférable. En plus d'empêcher une élévation de la température de sol, ces paillis se dégradent rapidement, ce qui n'est pas le cas pour le plastique.

Les arbres (Bouleau jaune et Chêne rouge) qui possèdent les dimensions morphologiques les plus élevées se retrouvent dans les zones les mieux drainées de la plantation, généralement au centre des planches (côté sud pour P94.4). Pour les paramètres morphologiques du Chêne rouge (P94.3), le tirage au sort des unités expérimentales peut avoir défavorisé les plants produits dans le récipient *28-340*. En effet, une seule unité expérimentale de ce traitement se retrouve au centre de la planche comparativement à trois (*1-350A* à 3,0 cm) et quatre (*25-350A*) pour les deux autres traitements (Annexe 7) et c'est à cet endroit (Bloc 7) que tous les plants sont morts. De plus, plusieurs plants de Chêne rouge (P94.3) situés en bordure de la planche sont très petits et vivotent.

Les analyses statistiques effectuées sur les concentrations en minéraux dans les tissus n'ont fait ressortir aucune différence entre les traitements de chaque expérience pour tous les éléments. Il est cependant très difficile de tenter d'établir des comparaisons entre les semis de nos dispositifs expérimentaux et les plants naturels parce que nous n'avons pas de standards pour les feuillus et que les plants naturels étaient beaucoup plus âgés pour des dimensions comparables.

Comme cela a été mentionné pour les conifères (Section 3.4), l'interprétation des résultats des analyses statistiques des systèmes racinaires doit être faite en prenant en compte la faible taille de l'échantillon principalement pour les résultats où l'on aurait obtenu des différences significatives si le seuil (α) avait été fixé à 0,10 (Savard 1999).

Aucune différence à un seuil α=0,05 n'a été observée pour le Bouleau jaune et seulement deux variables relatives à l'architecture du système racinaire en pépinière ont présenté des différences significatives pour le Chêne rouge. Les deux essences ont démontré leur capacité à développer des racines adventives, principalement le Bouleau jaune qui en produit autant que les Épinettes (Chapitre 3). Contrairement à ce qui a été observé avec l'Épinette noire et l'Épinette blanche (Chapitre 3), l'enroulement des racines n'a pas été un problème, même avec le récipient *45-340* qui possède des cavités rondes. Le matériau de ce récipient est du polystyrène et non du polyéthylène haute densité comme pour le *15-320*, ce qui rend probablement plus difficile le développement des racines en spirale dans le haut de la cavité.

L'utilisation du récipient à parois ajourées *25-350A*, et même celui avec un dessin amélioré (*1-350A*), n'a pas permis d'améliorer l'architecture du système racinaire qui s'est

développé dans les plantations. Les distributions des racines des plants cultivés dans les trois récipients évalués pour le Bouleau jaune sont bonnes et se rapprochent de ce qui est obtenu avec les plants naturels en excluant la présence de la carotte d'origine. En comptant les racines adventives, les semis de Bouleau jaune ont développé un nombre de racines latérales équivalant à celui des plants naturels. Pour le Chêne rouge (350 cm^3), les deux distributions sont également bonnes et elles sont comparables à celles des plants naturellement établis. Le nombre total de racines latérales est toutefois inférieur de moitié à celui des plants naturels. Les avantages escomptés avec l'utilisation de récipients à parois ajourées sur le nombre et la distribution des nouvelles racines de Bouleau jaune et de Chêne rouge ne se sont pas concrétisés (α=0,05) en plantations.

L'examen du développement de la carotte d'origine (récipients de 350 cm^3) fait ressortir que la persistance de la carotte d'origine et l'enchevêtrement des racines sont moindres que ce qui a été observé pour l'Épinette noire et l'Épinette blanche, principalement pour le Chêne rouge. Un blocage de l'allongement du pivot à l'ensemencement en pépinière entraîne une stimulation importante de la croissance des racines secondaires les plus distales et les plus grosses dès leur naissance (LAMOND *et al.* 1983). Même si des différences significatives ont été notées pour le Chêne rouge (récipients de 350 cm^3) pour l'enchevêtrement des racines et les déformations à la base de la carotte, la culture en récipients influence moins le développement racinaire du Chêne rouge. Les plants produits dans le récipient *25-350A* présentent néanmoins un enchevêtrement des racines et des déformations à la base de la carotte inférieurs à ceux observés dans le récipient *28-340*. Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent pour l'Épinette noire et l'Épinette blanche, les racines déformées commencent à s'estomper au fur et à mesure que la croissance racinaire progresse. Les racines déformées se recouvrent progressivement avec un grain de bois parallèle et reprennent une apparence plus normale (GILLGREN 1975 et PERSSON 1982). Même s'il est encore trop tôt pour l'affirmer, tout porte à croire que dans quelques années, toute trace de la carotte d'origine aura complètement disparu.

Les résultats obtenus avec les feuillus permettent d'invalider (Bouleau jaune) et de valider (Chêne rouge – récipients de 350 cm^3) notre hypothèse de départ : « les semis de feuillu produits dans des récipients à parois ajourées possèdent une structure racinaire plus horizontale et moins déformée qui permet aux semis d'avoir en plantations une distribution des racines, un taux de survie, une croissance et une stabilité supérieurs aux plants produits dans des récipients à parois pleines ». L'usage de récipients à parois ajourées n'a pas permis d'améliorer la performance ou le développement racinaire du Bouleau jaune. Toutefois, pour le Chêne rouge, l'utilisation d'un récipient à parois ajourées du type *25-350A* présente des avantages. Même si la stabilité des plants n'a pas encore été évaluée, il est presque certain, si l'on prend en compte la qualité actuelle du développement racinaire des semis dans les plantations, que ce problème ne se présentera pas dans l'avenir. Pour l'ensemble des plants évalués, le système racinaire de structure est certainement déjà en place (BURDETT *et al.* 1986).

Conclusion et perspectives d'avenir

Le problème majeur associé aux malformations racinaires est le manque de stabilité des plants. Le dessin du récipient, la durée de culture (SHEEDY 1990), les caractéristiques et la préparation de terrain en vue du reboisement ainsi que les techniques de mise en terre des plants influencent le développement racinaire et conséquemment la stabilité des plants (HALTER *et al.* 1993, LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). Le facteur clé pour la stabilité des plants est la relation entre la dimension des racines et la dimension de la partie aérienne (LINDSTRÖM et HÅKANSSON 1994). La croissance des racines est un phénomène complexe et difficilement prévisible. Les raisons d'une croissance inégale qui donne naissance à des racines de dimensions différentes ne sont pas bien connues, mais peuvent être examinées sous trois aspects : l'origine des racines (y compris la dimension de l'apex), leur position sur le système racinaire et l'environnement (COUTTS 1983). Les causes des malformations racinaires et sa résultante liée aux problèmes de stabilité sont très complexes car plusieurs facteurs sont en interactions. La façon dont sont cultivés les semis influence les chances qu'a un plant de développer un système racinaire efficace une fois mis en terre. Les méthodes de mise en terre, le choix du microsite, la scarification et le type de sol sont d'autres facteurs qui vont modifier la stabilité des plants (LINDSTRÖM 1998).

Les malformations racinaires peuvent également influencer l'orientation et la direction des fibres dans la souche, augmenter le risque de bris à l'endroit où la tige rejoint les racines, augmenter le risque d'infections fongiques, tel l'Armillaire (LIVINGSTON 1990), retarder la croissance et provoquer des déformations à la base de la tige (LINDSTRÖM 1998). Durant les cinq premières années dans les plantations, la plupart des espèces d'Épinette développent un nouveau système racinaire fait de racines adventives dont la symétrie est généralement satisfaisante (NEILSEN 1998). Les Pins n'ont toutefois pas la capacité des Épinettes de produire des racines adventives (BALISKI *et al.* 1995, BURDETT *et al.* 1986, DELEPORTE 1982, DITLEVSEN 1998, GIROUARD 1995, GRENE 1978a, LINDSTRÖM 1978, LINDSTRÖM 1990, ROSVALL 1998, SHEEDY 1990, VAN EERDEN 1978). Ceci signifie que les défauts de forme au système racinaire peuvent persister pour une longue période en plantations, voire la vie entière de l'arbre (ROSVALL 1998).

Les travaux menés par LINDSTRÖM et HÅKANSSON (1998) ont démontré que la fréquence des tiges courbées est plus faible pour l'Épinette de Norvège que le Pin tordu. L'architecture du système racinaire de l'Épinette est toutefois affectée par le dessin du récipient et les malformations peuvent être observées jusqu'à douze ans dans les plantations. Les plants qui ont les racines cernées en pépinières présentent peu de déformations dans les plantations. L'incidence de l'Armillaire est supérieure dans les peuplements avec des malformations racinaires. Au Danemark, le problème des malformations racinaires (racines nues) est plus grand pour les Pins parce qu'ils ne peuvent pas développer de racines adventives. Il faut de dix à vingt ans à un Pin pour développer un système racinaire symétrique. L'instabilité durant cette période affecte souvent la forme de l'arbre et aboutit quelquefois à un déracinement par le vent (DITLEVSEN 1998).

L'influence des déformations racinaires sur la croissance aérienne ne se fait généralement pas sentir pendant la première décennie de la plantation (DELEPORTE 1982). Des travaux d'excavation réalisés par NEWTON et COLE (1991) montrent que les malformations racinaires induites par la culture en récipients peuvent être vaincues après une période de cinq à dix ans. Des études récentes sur des sites à faible productivité démontrent que ce n'est cependant pas toujours le cas (BALISKI *et al.* 1995, HALTER et CHANWAY 1993, HALTER *et al.* 1993). Certains auteurs croient que les jeunes Pins avec des malformations racinaires passent par une période de forte vulnérabilité au renversement par le vent, avant que leur système latéral ne soit bien étendu (HUNTER et MAKI 1980). Durant les premières années, la partie centrale du système racinaire peut former un gonflement qui disparaît graduellement une fois recouvert d'une couche continue de cambium (GILLGREN 1975, HAGNER 1978, PERSSON 1982). Les déformations d'origine sont alors complètement entourées par un système racinaire large

et fibreux. Il est alors peu probable que les malformations des racines nuisent à la croissance à venir ou la stabilité des plants. Si les conditions sont favorables à la première année pour la survie et la croissance des plants, les déformations racinaires au moment de la plantation n'auront que peu d'effet subséquent sur le développement de la tige et des racines à l'âge de cinq ans (NEWTON et COLE 1991). Les travaux de VERGER et GINISTRY (1995) démontrent que les malformations racinaires induites (trois à onze ans en plantations) par la culture en récipients ne se sont pas résorbées. Cependant, aucun problème sur la croissance, la survie, la stabilité ou l'écart à la verticalité n'a été observé jusqu'à présent. D'après HAGNER (1978), les racines enchevêtrées forment des points de contact entre elles. Les vaisseaux conducteurs se fusionnent et les malformations des racines disparaissent avec la croissance racinaire. Les racines d'Épinette de Norvège peuvent se fusionner sans provoquer d'étranglement (DELEPORTE 1982). Selon GILLGREN (1975), personne n'a observé, en pratique, de la strangulation par les racines; ce terme est une pure construction théorique. Les glucides accumulés (causés par un étranglement de racines, ...) semblent être dirigés vers des racines latérales qui se développent près ou au-dessus (racines adventives) de la zone d'accumulation (HAASE *et al.* 1993, HAY et WOODS 1975, PREISIG *et al.* 1979).

Les informations récentes en provenance des pays scandinaves ou nordiques présentent un bilan beaucoup moins alarmiste sur les conséquences des malformations racinaires que ce qui était pressenti initialement. Durant la période jugée critique (1970-1983), seulement 2 % des plants (Pin sylvestre et Pin tordu) étaient sous le standard requis pour la stabilité en Suède (ACKSELL 1998). En Finlande, le manque de stabilité des plants n'est pas une source de problème. L'existence d'un tel problème à grande échelle n'a pas été démontrée (LASSHEIKKI 1998). L'instabilité des plants est un problème reconnu en Norvège. Ce problème a été principalement observé dans les plantations de Pin sylvestre et de Pin tordu et quelques fois dans les plantations d'Épinette de Norvège, mais seulement dans les sols lourds argileux. Aucune corrélation entre la symétrie des racines et la stabilité des plants (340 Pins tordus et 100 Épinettes de Norvège) n'a été trouvée (KOHMANN 1998). En Islande, les problèmes de stabilité sont principalement un souci pour les Pins tordus quoique, à ce stade-ci, aucun problème n'a été observé (ÁSGEIRSSON 1998).

Une étude de SCHULTZ (1973) ne donne aucune indication que la croissance initiale du Pin d'Elliott (*Pinus elliottii* Engelm.) est inhibée par les racines déformées et, douze ans plus tard, aucune malformation racinaire n'est visible. WOODS (1980) n'a trouvé aucune différence significative dans la survie et la croissance en hauteur sept ans après pour le Pin loblolly planté avec cinq configurations de racines. Cette étude ne fournit aucune preuve que la forme des systèmes racinaires influence la survie ou la croissance du Sapin de Douglas. Si toutes les autres erreurs d'une piètre mise en terre sont éliminées et tous les autres facteurs maintenus égaux, il y a une possibilité que les systèmes racinaires en L ou en J se forment aussi rapidement que pour les semis plantés correctement (HAASE *et al.* 1993). Pour les semis à racines nues, les plants auront développé, vingt à trente ans plus tard, un système racinaire à configuration satisfaisante (NEILSEN 1998).

Les expériences que nous avons réalisées depuis plusieurs années ont permis de préciser le potentiel des récipients à parois ajourées à produire des systèmes racinaires avec beaucoup moins de malformations lors de la culture des plants en pépinières. Ces travaux de recherche ont permis de concevoir le dessin d'un récipient à parois ajourées adapté à la production des PFD (GINGRAS 1993). Les travaux réalisés depuis cinq ans dans les plantations visent à préciser le potentiel réel des plants produits dans les récipients à parois ajourées afin d'évaluer notre hypothèse de départ : « Les semis (conifères et feuillus) produits dans des récipients à parois ajourées possèdent une structure racinaire plus horizontale et moins déformée qui permet aux semis d'avoir, dans les plantations, une distribution des racines, un taux de survie, une croissance et une stabilité supérieurs aux plants produits dans des récipients à parois pleines ».

Les résultats obtenus dans nos sept dispositifs expérimentaux de 1994 (2) et 1995 (5) ne permettent pas, à l'exception du Chêne rouge (récipients de 350 cm^3), de valider notre hypothèse de départ. En effet, l'utilisation de récipients à parois ajourées (*1-360A* et *25-350A*) et même une version améliorée du *25-350A*, le *1-350A*, ne permettent pas d'améliorer la performance des plants en plantations ainsi que leur développement racinaire. Dans leur rapport préliminaire (2 et 3 ans), GINGRAS et RICHARD (1999) avaient observé très peu de différences significatives entre les récipients à parois ajourées et les récipients à parois pleines pour le taux de survie et l'accroissement des paramètres morphologiques. Dans toutes les plantations expérimentales (conifères et feuillus), la qualité du développement racinaire des plants produits dans des récipients à parois ajourées était égale ou légèrement supérieure à

celle des semis produits dans des récipients à parois pleines. Ces différences, à l'exception du Chêne rouge, ont presque complètement disparu au fil des années. L'Armillaire est responsable dans la plupart des cas de la mort des plants dans nos quatre plantations d'Épinettes. Il n'est cependant pas possible d'affirmer que les malformations racinaires en sont la cause. Compte tenu de la qualité globale du développement racinaire et de la présence de racines adventives, il semble très peu probable que des problèmes de stabilité soient observés dans nos plantations au cours des années à venir. La seule inconnue est la persistance de la carotte d'origine. Toutefois, tout porte à croire que cette dernière aura disparu dans quelques années, occultée par la croissance racinaire (GILLGREN 1975, HAGNER 1978, PERSSON 1982).

La production des conifères en pépinières (P93.1, P94.1 et P94.2) a été faite en serre et les plants ont été mis en terre à l'aide d'une pioche forestière dans un sol qui avait été ameubli à l'aide d'une bonne préparation de terrain (rotoculteur ou scarificateur). Pour les feuillus, la production des plants et la mise en terre ont été faites de façon traditionnelle. De plus, comme cela a été mentionné dans la discussion (Chapitre 5), l'interprétation des résultats des analyses statistiques pour les systèmes racinaires doit être faite en prenant en compte la complexité de ce type d'analyse, les méthodes statistiques utilisées et le nombre d'échantillons (DEBLOIS 1999, SAVARD 1999, SEGARAN *et al.* 1979). Il aurait été assurément intéressant d'augmenter la précision de nos analyses en doublant ou triplant la taille de nos échantillons ainsi qu'en augmentant le nombre de plantations (autres sites, préparation de terrain, mise en terre des plants, ...). Toutefois, la charge de travail associée à l'extraction des systèmes racinaires et aux analyses subséquentes est trop élevée et il est permis de croire que les résultats n'auraient probablement pas permis de faire ressortir des différences supplémentaires entre les plants cultivés dans les récipients évalués. Une mauvaise préparation de terrain, des techniques inadéquates de mise en terre des plants ou des propriétés physico-chimiques du sol différentes auraient vraisemblablement influencé tous les traitements de la même façon (hypothèse non vérifiée). Selon CARLSON *et al.* (1980), les effets des techniques de culture et de la mise en terre sur la morphologie du système racinaire ne sont probablement pas assez importants pour causer une instabilité ou un retard de croissance des plants.

Ceci nous amène directement au cœur des préoccupations des responsables de la production de plants au Québec (Ministère des Ressources naturelles, Direction de la production des semences et des plants) : « Quel est le type de récipient le plus adapté à la production des PFD ? » Actuellement, la majorité des vingt millions de semis sont produits dans le récipient à parois ajourées *25-350A* qui est utilisé depuis 1995. Dans le cadre de nos expériences et à l'intérieur des limites imposées par les protocoles expérimentaux, il n'apparaît pas avantageux de produire des PFD d'Épinette noire et d'Épinette blanche et des semis de Bouleau jaune dans les récipients à parois ajourées évalués dans nos expériences. L'utilisation du *25-350A* comme récipient pour produire les PFD est correcte, et n'a comme point négatif que la gestion de l'irrigation en pépinière qui est plus difficile en raison des ouvertures dans les cavités. On ne peut cependant pas formuler de recommandation sur le potentiel du récipient *45-340*, également utilisé pour la production de PFD, parce qu'il n'a pas été évalué pour les Épinettes dans nos expériences.

Cette recommandation ne s'applique pas aux Pins qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude et qui n'ont pas la capacité de développer des racines adventives. Cette recommandation ne peut également pas être directement appliquée aux conifères produits sur une ou deux saisons de croissance dans des récipients de plus faible volume (50 et 110 cm^3) actuellement utilisés pour une production annuelle d'environ 75 millions de semis. Des expériences ont été réalisées en pépinière (évaluation de six types de récipients $\leq$ 220 cm^3 pour l'Épinette blanche) en 1998 et 1999 et le suivi en plantations comparatives a débuté au printemps 2000. Les résultats des analyses de développement racinaire qui seront effectuées dans ces plantations (3) permettront d'évaluer la même hypothèse de départ, mais avec des semis de dimensions plus faibles. La production de Chêne rouge, bien que minime dans le programme de reboisement du Québec, mériterait d'être réalisée dans le récipient à parois ajourées *25-350A*.

Le concept du récipient à parois ajourées est maintenant présent chez la plupart des fabricants de récipients (STUEWE & SONS, 1999) et, même l'industrie suédoise est en train de redessiner tous ses récipients pour tirer parti du cernage aérien (BRINKMAN 1995). Certaines compagnies offrent toujours des récipients dont les parois intérieures des cavités ont été traitées au cuivre. Il sera intéressant de consulter les ouvrages qui seront publiés dans l'avenir sur la performance des plants cultivés dans tous ces récipients. Il est important de se rappeler que les récipients à parois intérieures complètement lisses (sans rainures) ont disparu du marché ou ne sont plus utilisés. Beaucoup de plantations où

des problèmes de stabilité avaient été observés provenaient de plants cultivés dans ce type de récipient (ACKSELL 1998).

Les plants produits dans le récipient à parois ajourées Panth (Österhammar, Sweden) ont obtenu les plus hautes valeurs de torque (couple de torsion) parmi tous les autres plants cultivés dans différents types de récipients. Ils présentent une surface racinaire importante répartie dans quelques racines ainsi qu'une faible proportion de racines qui se sont développées en spirale (LINDSTRÖM 1990). Très peu ou aucune malformation racinaire n'a été observée sur les semis produits avec des Jiffy (Nouveau-Brunswick, Canada) ou Plantsystem 80 (cernage mécanique) et la distribution des racines dans le sol était uniforme (LINDSTRÖM 1997). La stabilité des plants est améliorée par l'utilisation de récipients cylindriques à parois perméables aux racines, ou par des récipients de section carrée à parois non perméables aux racines mais dont les côtés internes sont traités au cuivre afin d'assurer un cernage chimique des racines (CRÉMIÈRE 1994). Des tests de stabilité avec le Pin lodgepole ont démontré qu'il n'existe pas de différence entre les plants soumis à un cernage chimique et les Styroblocs (KRASOWSKI *et al.* 1996). La mise en terre d'un système racinaire doté d'une capacité de développement dans toutes les directions, laquelle permet au plant d'accéder à la zone très riche en minéraux (horizon organique) devrait être une pratique essentielle (BALISKI *et al.* 1995).

Au-delà du modèle de récipient à utiliser pour les différentes cultures de plants dans les pépinières, il est essentiel de mettre en terre les plants d'Épinette, de Bouleau jaune et de Chêne rouge à une profondeur suffisante (≈ 2 cm au-dessus de la carotte). Cette pratique stimulera le développement de racines adventives qui formeront une composante importante du futur système racinaire. Bien que nos expériences n'aient pas examiné ces aspects, toutes les précautions doivent être prises pour que le potentiel des plants ne soit pas diminué par des opérations (manutention, transport, conservation des plants, mise en terre, ...) inadéquates hors pépinière.

Pour la production de PFD (Épinette noire et Épinette blanche) et les feuillus (Bouleau jaune et Chêne rouge), il n'apparaît pas nécessaire d'entreprendre de nouvelles recherches sur la conception de récipients à parois ajourées. Il pourrait toutefois être intéressant d'évaluer les Pins, principalement le Pin gris (PFD et classique) qui représente environ 19 % de la production annuelle au Québec. Pour les productions courantes, le suivi des trois plantations établies au printemps 2000 fournira certainement des précisions importantes.

Références bibliographiques

ACKSELL, L., 1998. *Root development and stability – the scope and nature of the problem in Sweden.* Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 18-19.

APPLETON, B.L., 1995. *Nursery production methods for improving tree roots - an update.* J. Arbor. 21(6) : 265-270.

ARNOLD, M.A. et D.F. WELSH, 1995. *Effects of planting hole configuration and soil type on transplant establishment of container-grown live oak.* J. Arbor. 21(4) : 213-218.

ÁSGEIRSSON, S., 1998. *Seedling-stability problems in Iceland.* Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, p. 29.

ASHBY, W.C., 1995. *Oak seedling root and shoot growth on restored topsoil.* Tree Planters' Notes 46(2) : 54-57.

ATZMON, N., O. REUVENI et J. RIOV, 1994. *Lateral root formation in pine seedlings. II The role of assimilates.* Trees 8 : 273-277.

AUGER, I. 2000. *Bilan de croissance en plantation : morphologie et physiologie – Plantations de Biencourt et de Saint-Germain.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Rapport sur les analyses statistiques, 15 p.

BALISKI, A.C., P. SALONIUS, C. WALLI, et D. BRINKMAN, 1995. *Seedling roots and forest floor : Misplaced and neglected aspects of British Columbia's reforestation effort?* For. Chron. 71(1) : 59-65.

BEDENEAU, M. et D. AUCLAIR, 1989. *The study of tree fine root distribution and dynamics using a combined trench and observation window method.* Ann. Sci. For. 46(3) : 283-290.

BEISSALAH, Y., T. AMIN, B. EL-HAJZEIN et P. NEVILLE, 1988. *Étude de l'appareil radical de jeunes plants de chênes verts dont le pivot se développe sans amputation, ni déviation.* Ann. Sci. For. 45(1) : 53-70.

BRINKMAN, D., 1995. *Root form problems won't go away.* C.S.M. Spring 1995 : p. 6.

BURDETT, A.N., 1990. *Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock.* Can. J. For. Res. 20(4) : 415-427.

BURDETT, A.N., H. COATES, R. EREMKO et P.A.F. MARTIN, 1986. *Toppling in British Columbia's lodgepole pine plantations : significance, cause and prevention.* For. Chron. 62(5) : 433-439.

BURNS, R.M. et B.H. HONKALA, tech. Coords., 1990. *Silvics of North America, Volume 1 : Conifers; Volume 2 : Hardwoods.* Agriculture Handbook 654. USDA, Forest Service, Washington, DC. Vol. 2, 877 p. [En ligne]. [http://willow.ncfes.umn.edu/silvics_manual/Table_of_contents.htm].

CARLSON, W.C., C.L. PREISIG et L.C. PROMNITZ, 1980. *Comparative root system morphologies of seeded-in-place, bareroot and container-cultured plug Sitka spruce seedlings after outplanting.* Can. J. For. Res. 10 : 250-256.

COGLIASTRO, A., A. HALLÉ, M. LABRECQUE et S. DAIGLE, 1995. *Évaluation de trois contenants pour la production de plants d'espèces feuillues de fortes dimensions.* For. Chron. 71(4) : 459-465.

COLIN, F., F. DANJON et L. WEHRLEN, 1995. *Études racinaires au sein du programme « Croissance » de l'INRA* (Quercus petraea et Pinus pinaster). Rev. For. Fr. 47(Numéro spécial) : 165-172.

COUTTS, M.P., 1983. *Development of the structural root system of Sitka spruce.* Forestry 56(1) : 1-16.

COUTTS, M.P., 1989. *Factors affecting the direction of growth of tree roots.* Ann. Sci. For. 46(suppl.) : 277s-287s.

COUTTS, M.P. and G.J. LEWIS, 1983. *When is the structural root system determined in Sitka spruce?* Plant and Soil 71 : 155-160.

COUTTS, M.P., C. WALKER, et C. BURNAND, 1990. *Effects of establishment method on root form of Lodgepole pine and Sitka spruce and on the production of adventitious roots.* Forestry 63(2) : 143-159.

CRÉMIÈRE, L., 1994. *Conteneurs : quelles conséquences pour le pin maritime.* Afocel-Armef, Informations-Forêt, no 1 (fascicule 477) : 69-87.

DEBLOIS, J. 1999. *Étude du rendement de plants cultivés dans des récipients à parois ajourées.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Rapport sur les analyses statistiques, 28 p.

DELEPORTE, P., 1982. *Premiers résultats de trois essais de déformations racinaires.* Ann. AFOCEL : 164-239.

DITLEVSEN, B., 1998. *Root systems and stability – the current situation in Denmark.* Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 23-24.

FARRISH, K.W., 1991. *Spatial and temporal fine-root distribution in three Louisiana forest soils.* S. Sci. Soc. Am. J. 55(6) : 1752-1757.

GAGNON J., B.M. GINGRAS, D. GIRARD, M. LAMHAMEDI, M. RENAUD, S. RICHARD, N. ROBERT et L. VEILLEUX, 2000. *Recherche et développement en production de plants.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Rapport interne n° 453, 8 p.

GILLGREN, I., 1975. *On root whorl [root tangling], root deformation and root strangulation.* Translation, Environment Canada. 1975, No. OOENV TR 866, 53 p.; Transl. from Examensarbete i skosskotsel utfort hos Svenska Cellulosa AB 1971-72.

GILMAN, E.F., I.A. LEONE et F.B. FLOWER, 1987. *Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution.* J. Environ. Hort. 5 (1) : 33-36.

GILMAN, E.F. et M.E. KANE, 1990. *Root growth of red maple following planting from containers.* HortScience, 25(5) : 527-528.

GINGRAS, B.M., 1993. *Bilan provisoire des essais expérimentaux réalisés avec des récipients à parois ajourées.* Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts. Note de recherche forestière n° 56, 13 p.

GINGRAS, B.M., 1994. *Étude sur le cernage racinaire de plants produits en récipient.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 111, 55 p.

GINGRAS, B.M. et S. RICHARD, 1999. Bilan du développement des récipients à parois ajourées : culture des semis en pépinière et performance en plantations comparatives. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 130, 74 p.

GIROUARD, R.M., 1992. *Effects of growth duration in containers on root and shoot development of jack pine seedlings after outplanting.* Root ecology and its pratical application, 3. ISRR Symp. Wien, Univ. Bodenkultur, 1991, L. Kutschera, E. Hübl, E. Lichtenegger, H. Persson, M. Sobotik (eds.) - 1992 – Verein Für Wurzelforschung, A-9020 Klagenfurt.

GIROUARD, R.M., 1995. *Root form and stability of outplanted trees : results of a 1989 survey.* Arbor. J. 19(2) : 121-146.

GRAHAM, R.T., A.E. HARVEY, et M.F. JURGENSEN, 1989. *Effect of site preparation on survival and growth of Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco.) seedlings.* New For. 3(1) : 89-98.

GRENE, S., 1978a. *Root deformation and stability. Factors influencing root deformation and the consequences of these - examined for different planting methods.* Translation, 48 p.; Transl. from Dansk Skovforenings Tidsskrift (1977) 62(4) : 235-290.

GRENE, S., 1978b. *Root deformations reduce root growth and stability.* Proceedings of the root form of planted trees symposium held in Victoria British Columbia, May 16-19 1978 : van Eerden, E. (ed.); Kinghorn-JM. Root form of planted trees. Session B : Western Europe. 1978, 150-155.

GROSSNICKLE, S.C et R.S. FOLK, 1993. *Stock quality assessment : forecasting survival or performance on a reforestation site.* Tree Planters' Notes 44(3) : 113-121.

HAASE, D.L., J.H. BATDORFF et R. ROSE, 1993. *Effect of root form on 10-year survival and growth of planted Douglas-fir trees.* Tree Planters' Notes 44(2) : 53-57.

HAGNER, S., 1978. *Observations on the importance of root development in the planting of containerized seedlings.* Proceedings of the root form of planted trees symposium held in Victoria British Columbia, May 16-19 1978 : van Eerden, E.

(ed.); Kinghorn-JM. Root form of planted trees. Session B : Western Europe. 1978, 109-113.

HALTER, M.R. et C.P. CHANWAY, 1993. *Growth and root morphology of planted and naturally-regenerated Douglas fir and lodgepole pine*. Ann. Sci. For. 50(1) : 71-77.

HALTER, M.R., C.P. CHANWAY et G.J. HARPER, 1993. *Growth reduction and root deformation of containerized lodgepole pine saplings 11 years after planting*. For. Ecol. Manage. 56(1-4) : 131-146.

HAY, R.L., et F.W. WOODS, 1975. *Distribution of carbohydrates in deformed seedlings root system*. For. Sci. 21(3) : 263-267.

HUANG, B.K. et P. LIANG, 1988. *Effects of air-pruning on cutting and seedling growth*. Paper, Am. Soc. Agric. Eng. No. 88-1030, 22 p.

HUANG, B.K. et F. AI, 1992. *Air-pruned transplant production system for fully automated transplanting*. Acta Hortic. 319 : 523-528.

HUNTER, S.C. et T.E. MAKI, 1980. *The effects of root-curling on loblolly pine*. South. J. Appl. For. 4(1) : 45-49.

JOBIDON, R., 1996. [communication personnelle]. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière.

JOBIDON, R. et L. CHARETTE, 1997. *Effets, après 10 ans, du dégagement manuel simple ou répété et de la période de coupe de la végétation de compétition sur la croissance de l'épinette noire en plantation*. Can. J. For. Res. 27 : 1979-1991.

JOBIDON, R., L. CHARETTE et P.Y. BERNIER, 1998. *Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of* Picea mariana *(Mill.) BSP seedlings planted in three different environments*. For. Ecol. Manage. 103 : 293-305.

KOHMANN, K., 1998. *Root development and stability – producing seedlings for survival, increment and stability in Norway*. Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 25-28.

KOZLOWSKI, T.T., 1986. *Soil aeration and growth of forest trees (review article)*. Scand. J. For. Res. 1 : 113-126.

KRASOWSKI, M.J., C.D.B. HAWKINS, H. COATES et P.K. OTT, 1996. *Static tests of lodgepole pine stability in central interior of British Columbia*. Can. J. For. Res. 26 : 1463-1472.

LABRECQUE, L., 2000. [communication personnelle]. Ministère des Ressources naturelles, Bureau régional du Bas-Saint-Laurent – région 01.

LAMOND, M., R. TAVAKOL et A. RIEDACKER, 1983. *Influence d'un blocage de l'extrémité du pivot d'un semis de chêne, sur la morphogenèse de son système racinaire*. Ann. Sci. For. 40(3) : 227-249.

LASSHEIKKI, M., 1998. *Stability in young stands in Finland*. Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 20-22.

LINDSTRÖM, A., 1978. *Root deformation in different types of plant growing systems and possibilities of reducing root deformation*. Translation, Environment Canada, 1978, No. OOENV TR-1710, 93 p. Transl. from Rapporter och Uppsatser, Institutionen for Skogsforyngring, Skogshogskolan, Sweden, No. 91, 95 p. Limited distribution.

LINDSTRÖM, A., 1990. *Stability in young stands of containerized pine* (Pinus sylvestris). Translation, Environment Canada, 1990, 41 p. Transl. From Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research, 770 73 Garpenberg, Sweden, No 57. 22 p.

LINDSTRÖM, A., 1995. *Résumé d'une présentation effectuée le 25 janvier 1995*.

LINDSTRÖM, A., 1997. *Survey studies on root form of pine seedlings grown in different container types*. Högskolan Dalarna, CITU Centre for Industrial Technology and Development S-776 98 Garpenberg, Sweden. 3 p.

LINDSTRÖM, A., 1998. *Root deformation and its implications for container-seedling establishment and future development*. Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, report n° 7, 53-62.

LINDSTRÖM, A. et L. HÅKANSSON, 1994. *Going to the root of the evil*. Small Scale For. 94(2) : 19-23.

LINDSTRÖM, A. et L. HÅKANSSON, 1998. *Studies on the roots of planted Norway spruce*. Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 78-81.

LIVINGSTON, W.H., 1990. Armillaria ostryae *in young spruce plantations*. Can. J. For. Res. 20 : 1773-1778.

MARCELLI, A.R., 1993. *A new container type for tree seedling nursery production.* Estratto da l'Italia Forestale e Montana. Anno XLVIII – Fasc. no 1 : 20-24, Gennaio-Febbraio.

MARGOLIS H.A. et D.G. BRAND, 1990. *An ecophysiological basis for understanding plantation establishment.* Can. J. For. Res. 20 : 375-390.

MUNSON, A.D., H.A. MARGOLIS et D.G. BRAND, 1993. *Intensive silvicultural treatments : impacts on soil fertility and planted conifer responses.* Soil Sci. Soc. Am. J. 57 : 246-255.

NEILSEN, C.N., 1998. *Wind stability as affected by the quality of bare-root seedlings. Root development and stability.* Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 68-73.

NEWTON, M. et E.C. COLE, 1991. *Root development in planted Douglas-fir under varying competitive stress.* Can. J. For. Res. 21(1) : 25-31.

PAGES, L., et V. SERRA, 1994. *Growth and branching of the taproot of young oak trees - a dynamic study.* J. Exp. Bot. 45(278) : 1327-1334.

PELLICER, V., J.M. GUEHL, F.A. AUDET, M. CAZET, L.M. RIVIÈRE et P. MAILLARD, 2000. *Carbon and nitrogen mobilisation in Larix x eurolepis leafy stem cuttings assessed by dual ^{13}C and ^{15}N labeling : relationships with rooting.* Tree Physiol. 20 : 807-814.

PERSSON, P., 1982. *Instability in plantations – extent, causes and possible remedies. Root deformation of forest tree seedling – proceedings of a nordic symposium.* Håkan Hultén (ed.). The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research, Carpenberg, Report No. 11, 11-20.

PREISIG, C.L., W.C. CARLSON et L.C. PROMNITZ, 1979. *Comparative root system morphologies of seeded-in-place, bareroot, and containerized Douglas-fir seedlings after outplanting.* Can. J. For. Res. 9(3) : 399-405.

ROSVALL, O., 1998. *Requirements imposed by root-system stability mechanics on container design.* Root development and stability. Conference held at Garpenberg, Sweden, 30 September – 1 October, 1997, Report n° 7, 32-36.

SAVARD, F., 1999. *Étude du rendement de plants cultivés dans des récipients à parois ajourées (plantations de Biencourt et Saint-Germain).* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Rapport sur les analyses statistiques, 16 p.

SCHULTZ, R.P., 1973. *Site treatment and planting methods after root development of slash pine.* Res. Rap. SE-109. Asheville, NC : USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.

SEGARAN, S., R.K. RATHWELL, D.L. SHERRARD et W.E. FRITH, 1979. *Studies of bareroot and container plantations – 2. Root form of planted red pine* (Pinus resinosa Ait.) *seedlings in southeastern Minitoba.* Manitoba Department of Mines, Natural Resources and Development, Forestry Division, Forest Management Section, Tree Improvement and Forest Genetics Program, MS Report No 79-2, 86 p.

SHEEDY, G., 1990. *Résultats de l'enquête de 1989 sur la stabilité des plants de diverses plantations de pin gris et d'épinette noire.* Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la recherche et du développement. Note de recherche forestière n° 38, 12 p.

SHEEDY, G., 1991. *La stabilité des plants en contenant : qu'en est-il exactement? Résultats des évaluations réalisées dans 43 plantations de pin gris et d'épinette noire de l'Abitibi.* Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche et du développement. Note de recherche forestière n° 45, 16 p.

SHEEDY, G., 1993. *La stabilité des plants en contenant : résultats des évaluations réalisées dans 54 plantations de pin gris de l'Abitibi.* Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, Direction de la recherche et du développement. Note de recherche forestière n° 47, 18 p.

SHEEDY, G., 1996. *La stabilité des plantations : résultats des évaluations réalisées en 1989 et en 1994 dans six plantations de pin gris de l'Abitibi.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 69, 10 p.

STUEWE & SONS, 1999. *1999-2000 Catalog.* Stuewe & Sons, inc., 2290 SE Kiger Island Drive, Corvallis, Oregon 97333-9461 USA, 21 p.

SUTTON, R.F. et R.W. TINUS, 1983. *Root and root system terminology.* For. Sci. (Monograph 24). 137 p.

SUTTON, R.F. et T.P. WELDON, 1995. *White spruce establishment in boreal Ontario mixewood : 5-year results.* For. Chron. 71(5) : 633-638.

VAN DEN DRIESSCHE, R., 1987. *Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedlings*. Can. J. For. Res. 17(8) : 776-782. Dans Roots in forest soils : biology and symbioses, 4-8 Aug. 1986, Victoria, BC, Canada.

VAN EERDEN, E., 1978. *Root form of planted trees*. Proceedings of the root form of planted trees symposium held in Victoria British Columbia May 16-19 1978 : Eerden E van (ed.); Kinghorn-JM. Root form of planted trees. Session C : sub-boreal Canada and inland United States, 401-405.

VERGER, S. et C. GINISTRY, 1995. *Plants résineux en conteneurs pour la zone tempérée*. Office National des Forêts, Bulletin technique n° 28, 9-19.

WALINGA, I., J.J. VAN DER LEE, V.J.G.H HOUBA, W. VAN VARK et I. NOVOSAMSKY. 1995. Plant analysis manual. Methode Pana-A1/1-4. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

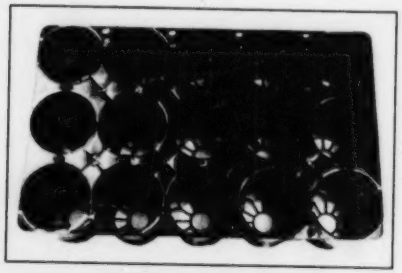
WARING, R.H. ET W.H. SCHLESINGER, 1985. *Forest Ecosystems – Concepts and mangement*. Academic Press, inc. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, 340 p.

WATSON, G.W. et E.B. HIMELICK, 1982. *Root distribution of nursery trees and its relationship to transplanting success*. Journal of Arboriculture 8(9) : 225-229.

WOODS, F.W., 1980. *Growth of loblolly pine with roots planted in five configurations*. South. J. Appl. For. 4 : 70-73.

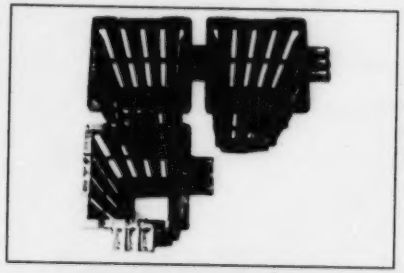
Annexes

Annexe A. Caractéristiques des récipients[1] utilisés



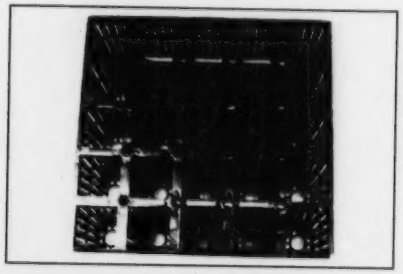
15-320

Fabricant : *IPL inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 15
Volume d'une cavité : 320 cm³



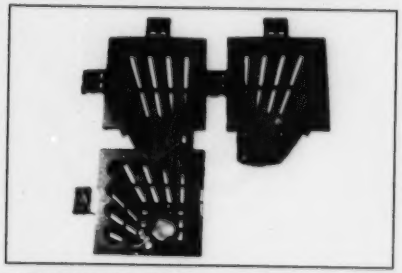
1-360A (1,0 ou 2,0 cm d'espacement)

Fabricant : *IPL inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 1
Volume d'une cavité : 360 cm³



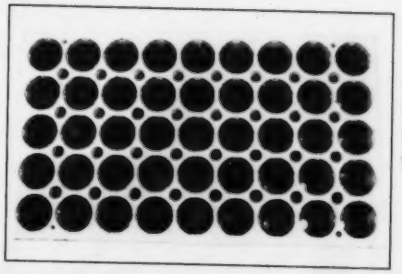
25-350A

Fabricant : *IPL inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 25
Volume d'une cavité : 350 cm³



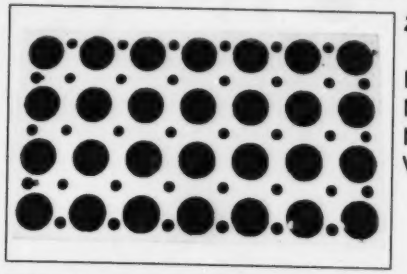
1-350A (1,5 ou 3,0 cm d'espacement)

Fabricant : *IPL inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 1
Volume d'une cavité : 350 cm³



45-340

Fabricant : *Beaver Plastics Ltd.*
Matériau : Styromousse
Nombre de cavités : 45
Volume d'une cavité : 340 cm³

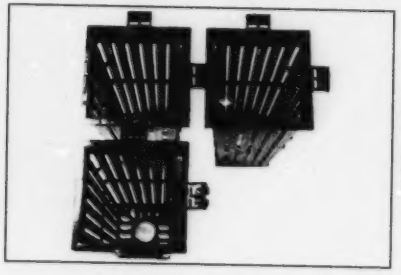


28-340

Fabricant : *Beaver Plastics Ltd.*
Matériau : Styromousse
Nombre de cavités : 28
Volume d'une cavité : 340 cm³

12-1000

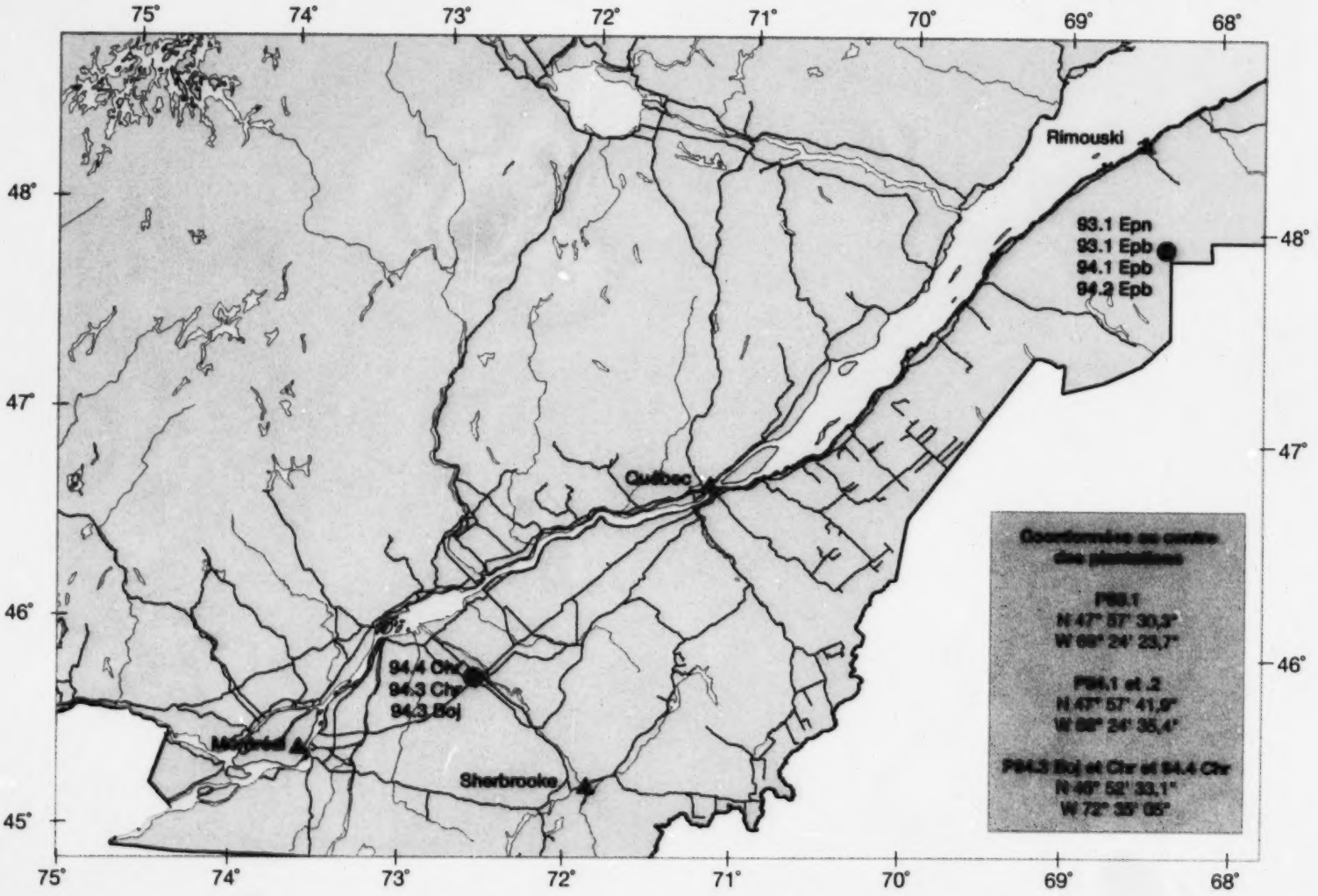
Fabricant : *Polymos inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 12
Volume d'une cavité : 1000 cm³



1-1050A (1,5 ou 3,0 cm d'espacement)

Fabricant : *IPL inc.*
Matériau : polyéthylène
Nombre de cavités : 1
Volume d'une cavité : 1050 cm³

[1] Extrait de GINGRAS et RICHARD (1999)



Annexe B. Localisation des sites expérimentaux

Annexe C. Caractéristiques des sites de reboisement[1]

Biencourt 1994 (93.1)

Zone écologique	Sapinière à Bouleau jaune
Peuplement d'origine	Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes
Année de la coupe	1991 - Mise en andains
Préparation de terrain	Rotoculteur (1993)
Orientation	90°
Pente	0-5 % pour les blocs 1-4 et 5-15 % pour les blocs 5-8
Type de sol	Classe texturale : loam; pierrosité : peu pierreux; présence de beaucoup de matière organique pour les blocs du bas (1-4)
Drainage	Moyen (Blocs 1-4) et rapide (Blocs 5-8)
Fertilité	Le 94-07-21 : N min. = 17 ppm, P disp. = 38 ppm et K éch. = 53 ppm. La fertilité est uniforme sur toute la plantation.
Année de mise en terre	1994
Outil de mise en terre	Pioche forestière
Densité de reboisement	2,5 m x 3,0 m. Des semis supplémentaires ont été intercalés au mètre le long des lignes pour les diverses récoltes durant les 5 premières années.
Végétation de compétition	Framboisier, régénération naturelle en Sapin baumier, Érable rouge, Sureau rouge, Aulne rugeux et Bouleau jaune. La compétition est faible dans le bas de la plantation (blocs 1-4) et devient abondante et dense dans le haut (blocs 5-8).
Précipitations (juin-sept.) [1]	1994 = 503 mm; 1995 = 367 mm

Biencourt 1995 (94.1 et 94.2)

Zone écologique	Sapinière à Bouleau jaune
Peuplement d'origine	Sapin baumier, Bouleau jaune et Épinettes
Année de la coupe	1991 - Mise en andains
Préparation de terrain	Rotoculteur (1993). Le scarificateur à disques a dû être utilisé en 1995 pour dégager les lignes de plantation qui ne sont pas nécessairement les mêmes que celles tracées par le rotoculteur.
Orientation	90°
Pente	15-20 %
Type de sol	Classe texturale : loam limoneux; pierrosité : très pierreux
Drainage	Rapide
Fertilité	——
Année de mise en terre	1995
Outil de mise en terre	Pioche forestière
Densité de reboisement	2,0 m x 2,0 m
Végétation de compétition	Framboisier, Épilobe, Sapin baumier, Érable rouge et Sureau rouge. La compétition est forte et uniforme dans toute la plantation.
Précipitations (juin-sept.) [1]	1995 = 367 mm

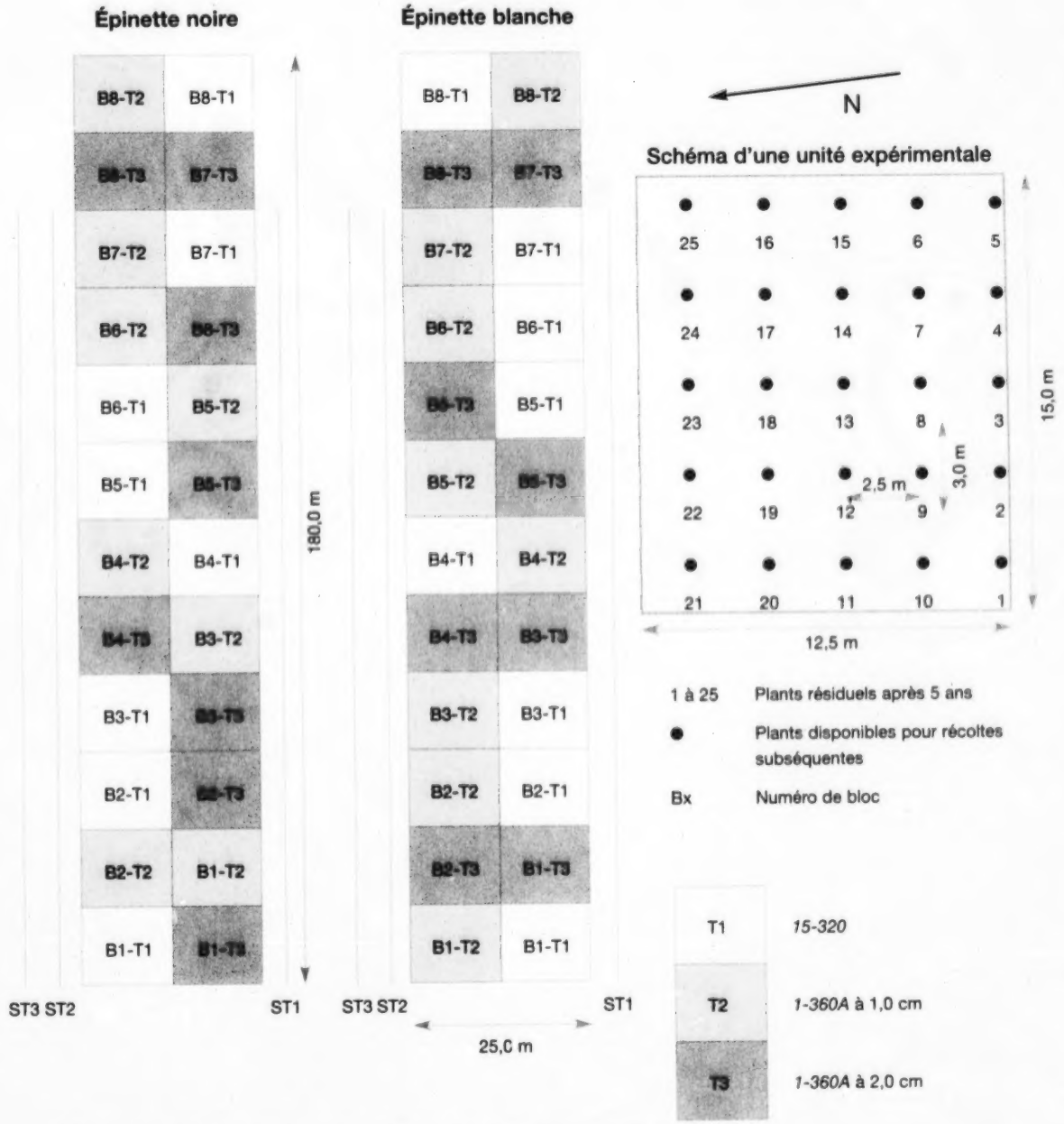
Saint-Germain de Grantham 1995 (94.3)

Zone écologique	Érablière à Tilleul
Peuplement d'origine	Terre agricole abandonnée depuis 2 à 3 ans
Année de la coupe	——
Préparation de terrain	Labourage et herse agricole; paillis en longueur avec collerettes à la base de chaque plant
Orientation	45°
Pente	0 %; terrain plat subdivisé en planches agricoles
Type de sol	Classe texturale : loam argileux sableux, pierrosité : peu pierreux
Drainage	Moyen dans l'ensemble avec une zone de mauvais drainage dans le dispositif 94.3 avec le Chêne rouge
Fertilité	——
Année de mise en terre	1995
Outil de mise en terre	Pelle
Densité de reboisement	3,5 m x 2,0 m
Végétation de compétition	Chiendent, Trèfle et quelques Saules près des fossés. Fauchage du foin à chaque année entre les rangées de paillis (2-3 coupes).
Précipitations (juin-sept.) [1]	——

[1] Jobidon (1996)

[1] Extrait de Gingras et Richard (1999)

Annexe D. Schéma des dispositifs expérimentaux[1] P93.1 Épinette noire et P93.1 Épinette blanche



S Rangée de 50 plants supplémentaires pour chacun des six traitements

[1] Extrait de GINGRAS et RICHARD (1999)

Inventaire d'observation des systèmes racinaires (récipients et semis naturels)

Identification du plant

Observateurs _____
_____
_____

Dispositif ou localisation		■	◆	●
Essence		■	◆	●
Traitement		■	◆	
Bloc		■	◆	
Plant		■	◆	●
Date de récolte		■	◆	●

Observations et mesures

Hauteur	(cm)		■	◆	●
Diamètre	(mm)		■	◆	●
Formation de racines adventives	oui (1), non (0)		■	◆	
Distribution des racines adventives sur 360°	nulle (1), faible (2), moyenne (3), bonne (4), élevée (5)		■	◆	
Distribution des racines sur 360°	nulle (1), faible (2), moyenne (3), bonne (4), élevée (5)		■	◆	●
Distribution verticale des racines	nulle (1), faible (2), moyenne (3), bonne (4), élevée (5)		■	◆	●
Enroulement des racines (haut de la carotte)	nul (5), faible (4), moyen (3), désavantageux (2), sévère (1)		■	◆	
Persistance de la carotte initiale	nulle (5), faible (4), moyenne (3), désavantageuse (2), sévère (1)		■	◆	
Enchevêtrement des racines	nul (5), faible (4), moyen (3), désavantageux (2), sévère (1)		■	◆	●
Déformation à la base de la carotte	nulle (5), faible (4), moyenne (3), désavantageuse (2), sévère (1)		■	◆	
Écoulement de résine ou de sève	oui (1), non (0)		■	◆	●

Racines adventives

- nombre de racines ■ ◆
- diamètres (mm) ■ ■
- masse anhydre (g) ■

Carotte initiale

- nombre de racines qui émergent de la carotte ■ ◆
- masse anhydre des racines émergeant de la carotte (g) ■
- masse de la carotte (g) ■
- masse anhydre de la tige au niveau des adventives (g) ■

Autres

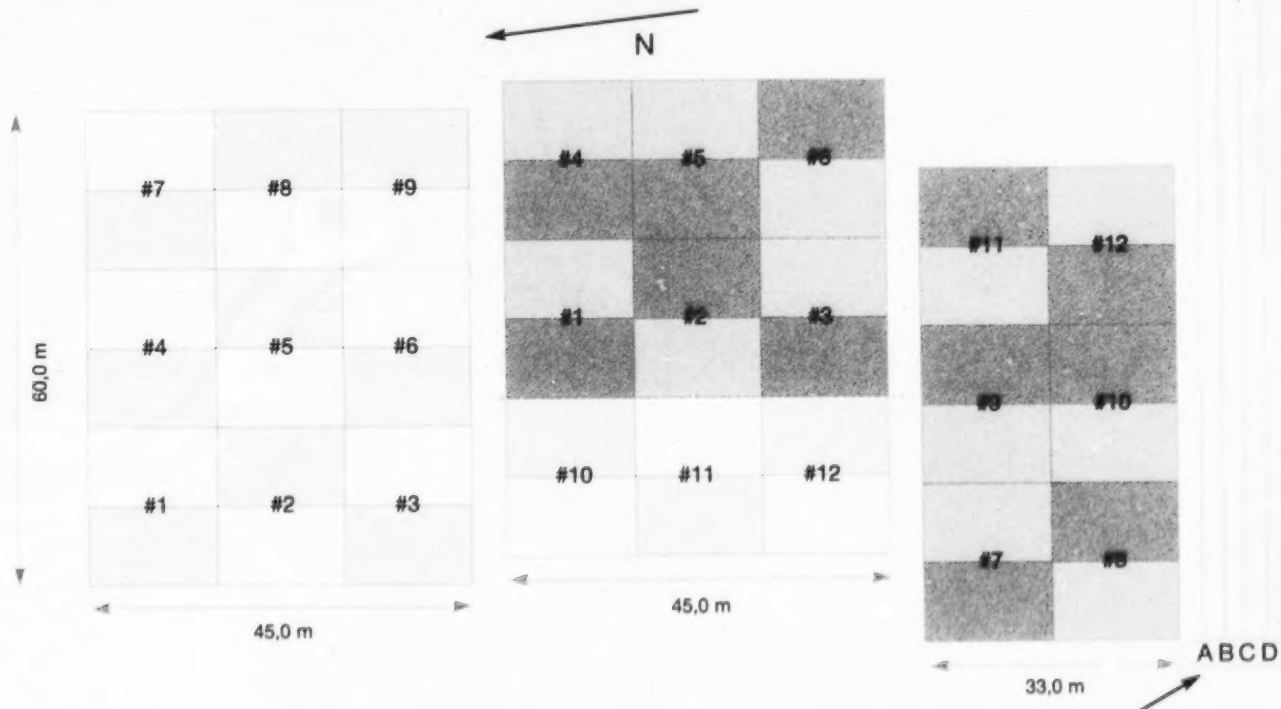
- Estimation de l'âge du plant ●
- Nombre total de racines latérales de premier ordre ●

Remarques et observations supplémentaires

_____
_____
_____
_____

■ Conifères régénérés artificiellement
◆ Feuillus régénérés artificiellement
● Semis régénérés naturellement

Annexe F. Schéma des dispositifs expérimentaux[1] P94.1 Épinette blanche et P94.2 Épinette blanche



x Numéro de bloc

94.1 ***1-350A* à 1,5 cm**

94.1 ***25-350A***

94.2 ***1-350A* à 1,5 cm**

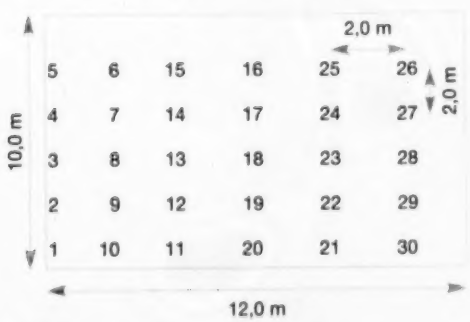
94.2 ***1-350A* à 3 cm**

Plants supplémentaires pour chacun des 4 traitements :

A : P94.1 ***25-350A***
B : P94.1 ***1-350A* à 1,5 cm**
C : P94.2 ***1-350A* à 1,5 cm**
D : P94.2 ***1-350A* à 3,0 cm**

Chaque bloc compte 2 unités expérimentales et mesure 20,0 m de longueur sur 6 sillons de largeur (env. 12,0 m);
Chaque unité expérimentale compte 30 semis (6x5); les semis sont espacés d'environ 2,0 m entre les sillons et de 2,0 m le long des sillons;
Chaque traitement compte 360 semis (30x12);
La plantation compte 1440 semis (4x360).

Schéma d'une unité expérimentale



[1] Extrait de Gingras et Richard (1999)

Annexe G. Schéma des dispositifs expérimentaux P94.3 Bouleau jaune, P94.3 Chêne rouge et P94.4 Chêne rouge

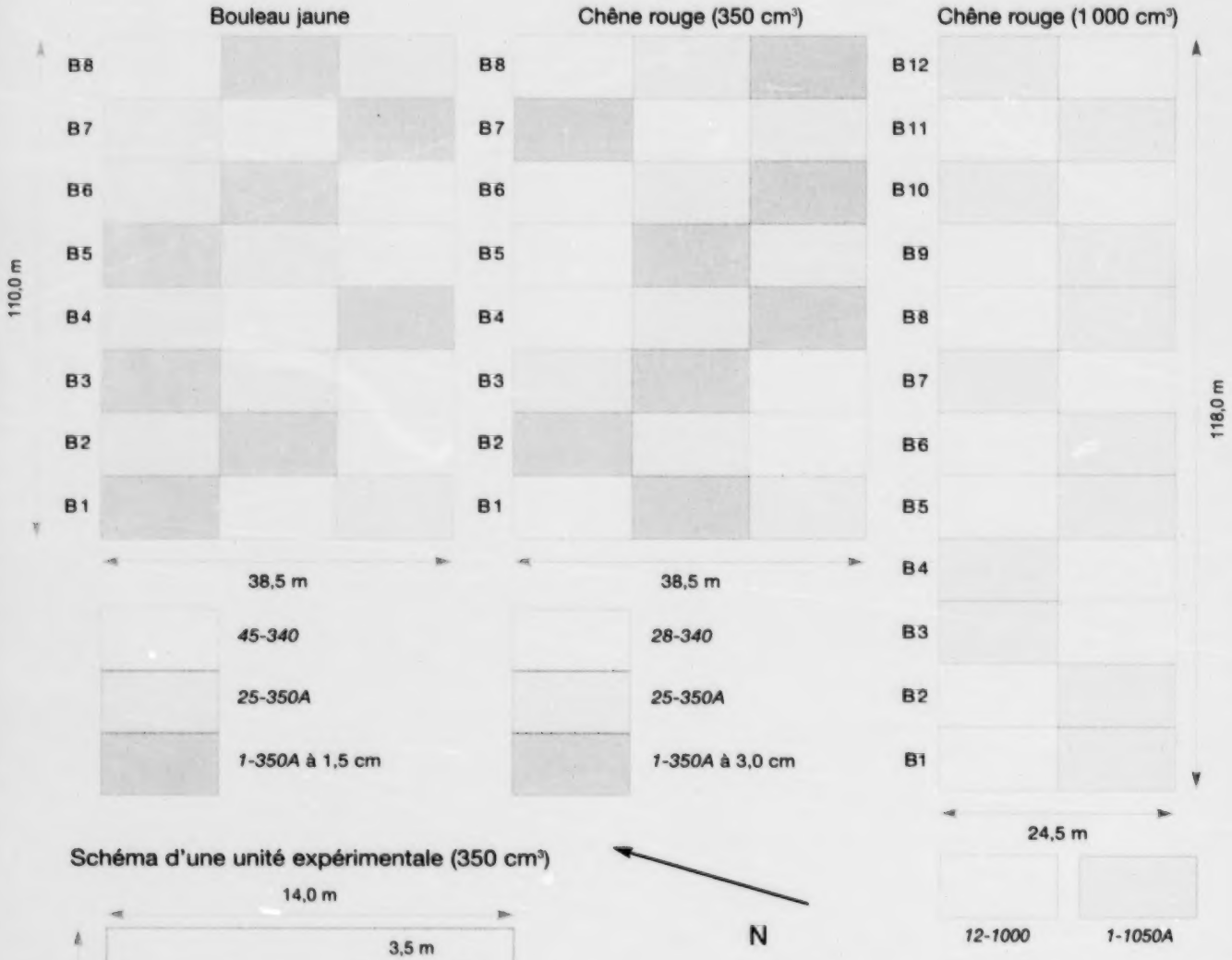


Schéma d'une unité expérimentale (350 cm³)

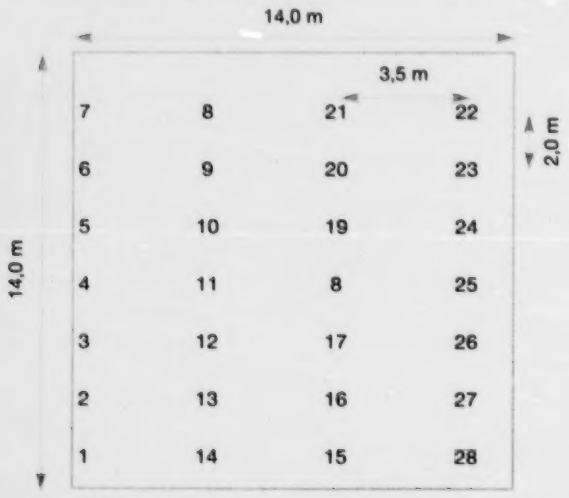
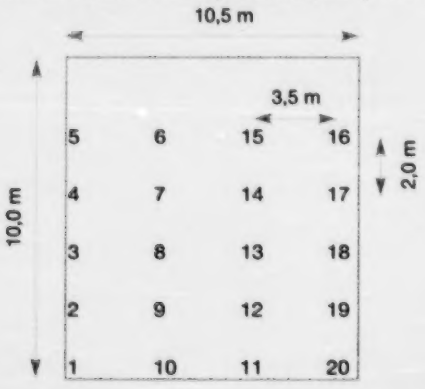
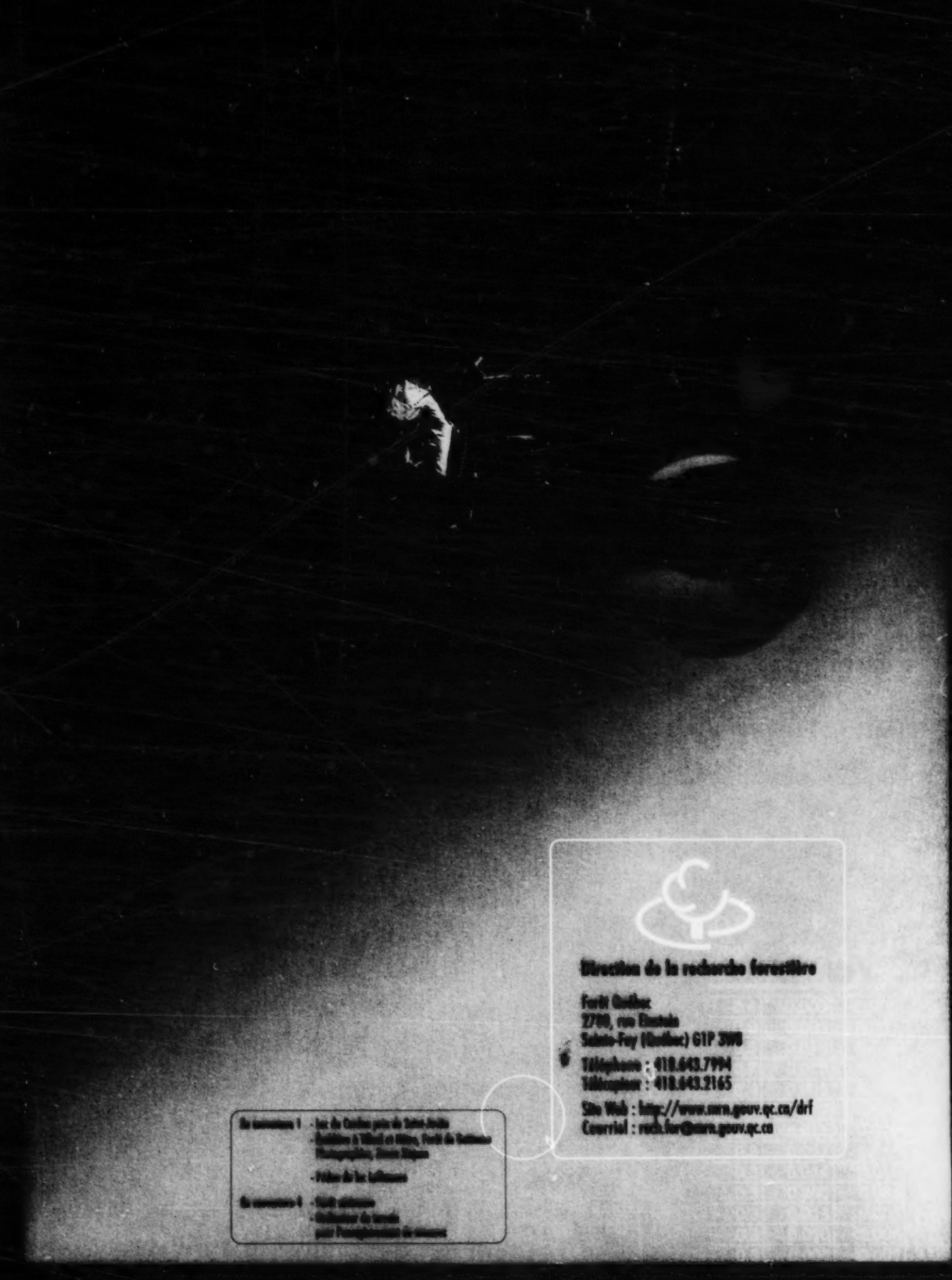


Schéma d'une unité expérimentale (1 000 cm³)





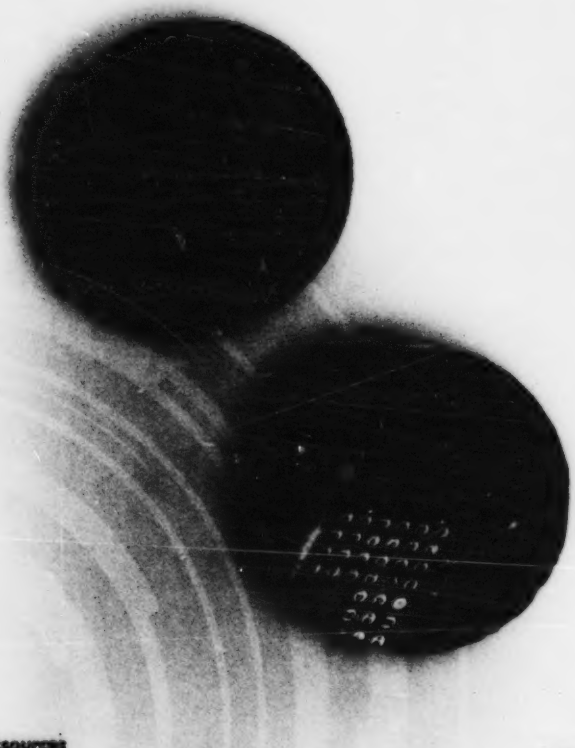
Direction de la recherche forestière

Forêt Québec
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418.643.7994
Télécopieur : 418.643.2165

Site Web : http://www.mrn.gouv.qc.ca/drf
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca

Pour rencontrer ses objectifs de reboisement, le ministère des Ressources naturelles doit s'assurer que l'on met bien tout en œuvre pour produire et mettre en terre des plants de qualité dotés d'une grande rapidité d'installation et d'un fort potentiel de croissance. Les travaux de recherche sur le développement des récipients à parois ajourées réalisés à la Direction de la recherche forestière ont permis d'accroître nos connaissances sur la dynamique de la croissance des racines en pépinières et en plantations et de préciser les caractéristiques des récipients qui devraient être utilisés pour la production de plants de fortes dimensions.



Ressources naturelles
Québec

ISBN 2-550-39097-0
F.D.C 232.329.6 (047.3) (714)
L.C. SD 404.3
2002-3056